



UNIVERSIDAD DE CUENCA
Facultad de Ciencias Químicas
Carrera de Ingeniería Ambiental

“Valoración económica del servicio ambiental de provisión de agua del páramo andino ubicado en la zona contigua al Bosque Protector Cubilan, provincia del Cañar”

***Trabajo de titulación previo a la obtención
del Título de Ingeniero Ambiental***

DIRECTOR:

Ing. Alex Manuel Avilés Añazco PhD
C.I. 010224718-6

AUTOR:

Carlos Santiago Delúquez Moreno
C.I. 010520101-6

Cuenca – Ecuador

2018

RESUMEN

El páramo es un ecosistema de alta montaña que juega un papel clave para el recurso hídrico, regulándolo y asegurando su calidad en los efluentes que alimenta. Actividades como la ganadería intensiva, pueden llegar a deteriorar las propiedades reguladoras del suelo, y hasta incrementar la carga de sedimentos en los cauces (Céleri, 2010). Este trabajo se llevó a cabo en la zona contigua al Bosque Protector Cubilan ubicada en la provincia del Cañar, Ecuador. en un área de estudio de 804,96 *ha* comprendida en su mayoría por páramo herbazal, la cual evidenciaba la presencia de ganadería (Fundación ECOHOMODE, 2006). Se calculó el valor económico del servicio de provisión de agua para dicha área mediante la metodología propuesta de Barrantes & Vega (2001). Para ello, primero se determinó la extensión de páramo por medio de la clasificación supervisada de imágenes satelitales (391,8 *ha*), posteriormente se estimó la oferta hídrica por medio del método de Isoyetas (220,44 *mm/año*), utilizando registros anuales de precipitación del INAHMI para el período 1981-2010; y finalmente, se estimó el costo de oportunidad de la ganadería mediante revisión bibliográfica (145,59 $\$/ha/año$). El valor para el servicio de provisión de agua en el área de estudio fue 0,052 $\$/m^3$, y se determinó que dicho valor presenta una buena aproximación, considerando el obtenido por Castro en el 2011 (0,03 $\$/m^3$); sin embargo, podrían existir variaciones en este valor de obtenerse el costo de oportunidad mediante encuestas y de utilizarse un método más preciso para la estimación de la oferta hídrica.

Palabras clave: PÁRAMO, SERVICIO DE PROVISIÓN DE AGUA, COSTO DE OPORTUNIDAD, GANADERÍA INTENSIVA, CLASIFICACIÓN SUPERVISADA, OFERTA HÍDRICA.

ABSTRACT

Páramo is a high mountain ecosystem that has a key role in the regulation and provision of the hydric resource, apart from assuring its quality. Activities like intensive livestock farming can deteriorate the regulation properties of the soil, and even it could increase the sediment load (Célleri, 2010). This project took place in the adjacent area of Bosque Protector Cubilán, in a study area of 804,96 *ha*, that includes in its majority grassland paramo that showed signs of livestock activity (Fundación ECOHOMODE, 2006). The economic value of the water provision service was calculated for the study area, with the methodology proposed by Barrantes & Vega (2001), the one that has been applied already in Ecuador by Castro (2011). For that purpose, first the extension of paramo was determined (391,8 *ha*) by means of the supervised classification of satellite images. Subsequently the water supply was estimated by the isohyetal method, utilizing registers of annual rainfall provided by the INAMHI for the 1981-2010 period; and finally, the cost of opportunity for livestock farming was estimated through a bibliographic revision. The value of water provision service for the study area was 0,052 \$/ m^3 , and it was determined that it offers a good approximation to the real value, considering the one calculated by Castro in 2011 (0,03 \$/ m^3); however, there could be variations on this value if the cost of opportunity is obtained through surveys and if a more precise method is used to estimate the water supply.

Keywords: PÁRAMO, WATER PROVISION SERVICE, COST OF OPPORTUNITY, INTENSIVE LIVESTOCK FARMING, SUPERVISED CLASSIFICATION, WATER SUPPLY.



ÍNDICE

Capítulo I	14
1. Valoración de servicios ambientales de los páramos	14
1.1. Los páramos.....	14
1.2. Bienes y servicios ambientales de los ecosistemas	14
1.3. Servicios ambientales hidrológicos del páramo	15
1.4. Impactos de la actividad antrópica sobre el páramo	16
1.5. Ganadería en el páramo	16
1.6. Economía ambiental y valor económico total	17
1.7. Valoración económica de servicios ambientales	18
1.8. Método del costo de oportunidad.....	18
2. Oferta hídrica	19
2.1. Ciclo hidrológico y balance hídrico.....	19
2.2. Oferta hídrica superficial	19
2.3. Precipitación media de una cuenca	20
2.4. Evapotranspiración	21
2.5. Evapotranspiración potencial y de referencia.....	22
2.6. Métodos de estimación de la evapotranspiración	22
3. Teledetección	23
3.1. Geomática	23
3.2. Teledetección	24
3.3. Radiación electromagnética.....	24
3.4. Radiancia y reflectancia.....	25
3.5. Firmas espectrales	25
3.6. Componentes de un sistema de teledetección.....	26
3.7. Resolución de un sensor	27
3.8. Principales programas de percepción remota	27
3.9. Aplicaciones de la teledetección	27
4. Clasificación de coberturas	28
4.1. Comportamiento espectral de la vegetación	28
4.2. Fotointerpretación.....	29
4.3. Pre-procesamiento de imágenes satelitales.....	30
4.4. Método de dos1	30
4.5. Sistemas de clasificación.....	31
4.6. Análisis estadístico de la clasificación de imágenes	31
Capítulo II	33



5. Metodología.....	33
5.1. Área de estudio	33
5.2. Valoración económica del servicio ambiental.....	34
5.3. Determinación del área bajo cobertura de páramo	34
5.3.1. Obtención de imágenes satelitales	34
5.3.2. Pre-procesamiento de imágenes	35
5.3.3. Clasificación supervisada y post-procesamiento.....	35
5.3.4. Análisis estadístico de la clasificación	36
5.4. Estimación de la oferta hídrica.....	37
5.4.1. Escorrentía superficial	37
5.4.2. Precipitación media anual.....	38
5.4.3. Estimación de la et por el método de holdridge	39
5.4.4. Temperatura ambiente	39
5.4.5. Evapotranspiración real (etr).....	40
5.5. Estimación del costo de oportunidad	41
Capítulo III	43
6. Resultados.....	43
6.1. Cobertura de páramo.....	43
6.1.1. Clasificación supervisada	43
6.1.2. Post-procesamiento y análisis estadístico de la clasificación.....	45
6.1.3. Área estimada	46
6.2. Oferta hídrica.....	47
6.2.1. Precipitación media anual.....	47
6.2.2. Temperatura ambiente	48
6.2.3. Evapotranspiración.....	50
6.2.4. Oferta hídrica.....	50
6.3. Costo de oportunidad	50
6.4. Valoración económica del servicio de provisión de agua	50
7. Discusión.....	51
8. Conclusiones	52
9. Recomendaciones	53
10. Referencias.....	54
11. Anexos.....	61



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Desglose del Valor económico total	17
Tabla 2. Métodos para calcular la ETP	23
Tabla 3. Aplicaciones de la teledetección en función de las bandas espectrales.	28
Tabla 5. Estaciones meteorológicas del INAMHI seleccionadas.	37
Tabla 6. Clases y ROI definidos para la primera clasificación supervisada.	44
Tabla 7. Clases y ROI definidos para la segunda clasificación supervisada.	44
Tabla 8. Matriz de confusión de clases.	45
Tabla 9. Índices Kappa y resultados de la matriz de confusión.	46
Tabla 10. Estimación del área ocupada por cobertura.	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Resultados gráficos del método de polígonos de Thiessen (izq.) y el de Isoyetas (der.).....	21
Figura 2. Espectro electromagnético.....	24
Figura 3. Firmas espectrales típicas para vegetación, suelo y agua, en el rango visible e infrarrojo reflejado del Espectro electromagnético.	26
Figura 5. Esquema del proceso de clasificación supervisada.	31
Figura 6. Ubicación del área de estudio.....	33
Figura 7. Zonas que se establecieron para la obtención de ROI.....	36
Figura 8. Localización de las estaciones meteorológicas seleccionadas.....	38
Figura 9. ROI determinados para la clasificación supervisada (polígonos en color naranja).	43
Figura 10. Clasificación supervisada en base a las clases definidas (izq.), clasificación supervisada en base a las clases definidas y el logaritmo del Método de Máxima Probabilidad.....	45
Figura 11. Mapa de uso de suelo del área de estudio.....	47
Figura 12. Mapa de Isoyetas generado en base a los registros de las estaciones meteorológicas seleccionadas.	48
Figura 13. Índice de correlación entre temperatura media registrada en las estaciones y la altura a la que se encuentran.	49
Figura 14. Ráster de la temperatura media en el área de estudio, considerando la gradiente altitudinal.....	49
Figura 15. Polígono del área de estudio, delimitado en la composición RGB de las imágenes de Sentinel-2A.....	61
Figura 16. Documento escaneado de la bitácora de visita de campo (página 1).....	62
Figura 17. Documento escaneado de la bitácora de visita de campo (página 2).....	63
Figura 18. Documento escaneado de la bitácora de visita de campo (página 3).....	64
Figura 19. Documento escaneado de la bitácora de visita de campo (página 4).....	65
Figura 20. Registro fotográfico del área de estudio.....	66
Figura 21. Registro fotográfico de la Laguna de Saguin (actualmente un humedal)....	66



Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Carlos Santiago Delúquez Moreno autor del trabajo de titulación "VALORACIÓN ECONÓMICA DEL SERVICIO AMBIENTAL DE PROVISIÓN DE AGUA DEL PÁRAMO ANDINO UBICADO EN LA ZONA CONTIGUA AL BOSQUE PROTECTOR CUBILAN, PROVINCIA DEL CAÑAR", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 17 de Octubre del 2018

Carlos Santiago Delúquez Moreno

C.I: 0105201016



Cláusula de Licencia y Autorización para Publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Carlos Santiago Delúquez Moreno en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "VALORACIÓN ECONÓMICA DEL SERVICIO AMBIENTAL DE PROVISIÓN DE AGUA DEL PÁRAMO ANDINO UBICADO EN LA ZONA CONTIGUA AL BOSQUE PROTECTOR CUBILAN, PROVINCIA DEL CAÑAR", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 17 de Octubre del 2018.

Carlos Santiago Delúquez Moreno

C.I: 0105201016



DEDICATORIA

Este trabajo de titulación va dedicado a mi familia, a los que agradezco infinitamente por todo el cariño incondicional, por dejarme ser, y por apoyarme en mis locuras. Gracias totales.



AGRADECIMIENTOS

De manera especial agradezco a mi director de tesis el Ing. Alex Manuel Avilés PhD. por su ayuda y apoyo durante el inicio, transcurso y culminación de este trabajo.

Al Blgo. Danilo Mejía MSc, por su asesoría y apoyo durante todo el proceso de elaboración del proyecto.

A la Blga. María Elisa Durán MSc. por su apoyo y ayuda durante la concepción del proyecto.

Al Departamento de Gestión Ambiental del Municipio de Azogues, por su ayuda en la concepción del proyecto y todo el apoyo proveído durante la elaboración del mismo.

A mis amigos Alejandro y Daniela por toda la ayuda y la alegría que me brindaron durante la elaboración de este proyecto.

INTRODUCCIÓN

Los páramos son ecosistemas alto-andinos ubicados por encima de los bosques montanos (entre los 2.000 a 4.000 m.s.n.m.), caracterizados por un alto grado de especies endémicas (60% de la flora vascular), y con condiciones climáticas peculiares; que incluyen temperaturas promedio anuales menores a los 10°C, humedad relativa atmosférica mayor al 70% y una muy baja evapotranspiración (Kappelle & Horn, 2005). El paisaje en estos ecosistemas suele ser bastante homogéneo y están compuestos por vegetación de poca altura (pajonales, arbustos, rosetas y almohadillas) con parches dispersos de bosque (comúnmente *Polylepis*) (Vásconez & Hofstede, 2006). En el Ecuador el páramo abarca unos 12.600 Km^2 , ocupando el 5% del territorio y posee una gran importancia desde el punto de vista ecológico, por su gran biodiversidad (Charaqui & Suarez, 2016). Debido a que este ecosistema juega un papel clave en la regulación hidrológica y la provisión de agua para las poblaciones de las tierras bajas (quienes usan el recurso para consumo, riego o generación electricidad), muchas instituciones públicas y privadas han incrementado sus esfuerzos para conservarlo (Cárdenas & Tobón, 2017).

La introducción de especies exóticas (comúnmente *Pinus radiata*), el sobrepastoreo, y las quemadas asociadas a la ganadería y la agricultura, están provocando graves daños a los páramos (Charaqui & Suarez, 2016). Por esta razón en el Ecuador solo un 30% de estos ecosistemas está bien conservado, mientras un 40% ha sido intervenido en cierto grado y el restante 30% está completamente transformado (Llambí, 2014). Los servicios ambientales hidrológicos (SAH) del páramo, que incluyen el mantenimiento de flujos base en época seca y la disminución de las caudales de crecida (regulación hídrica), además de proveer de agua de calidad con poca carga de sedimentos, pueden verse afectados negativamente por el cambio de uso de suelo. Por ejemplo, la ganadería en el páramo produce un aumento en la densidad aparente del suelo, reduciendo su capacidad de retener agua, y generando un aumento en la carga de sedimentos (Céleri, 2010).

En la región Andina y en el Ecuador se han generado esfuerzos para promover la conservación de los servicios ambientales hídricos (SAH) del páramo y del bosque andino, a través de esquemas de pago por servicios ambientales (PSA), que tienen el objetivo de que los usuarios directos del agua paguen por dichos servicios (Quintero, 2010). Estos esquemas suelen ser complejos e involucran aspectos sociales como la negociación de precios, así como el cálculo y valoración económica de los servicios

ambientales. En los andes ecuatorianos existen 6 casos de mecanismos financieros para proteger los SAH, que se encuentran en: el Municipio de Pimapiro, Municipio del Chaco, en la cuenca alta del río Guayllabamba (FONAG-FN), el Municipio de Célica, las áreas que abastecen de agua a la ciudad de Loja, y el Municipio de Zamora (Microcuencas del río Limón, Imbana, Genairo, Saballa y Jamboe).

En el año 2006, en el plan de manejo del Bosque Protector Cubilan, se propuso la incorporación de 757.83 *ha* (en su mayoría páramo) ubicadas en el área contigua a dicho bosque, con el fin de conservarlas y así beneficiar a las comunidades (Zhindilig, Virgenpamba y Aguilán) ubicadas en la parte baja de las microcuencas del río Tabacay y río Aguilán (Fundación ECOHOMODE, 2006). Sin embargo, esta meta no se ha logrado hasta la fecha, por lo que esta investigación busca estimar el valor económico de uno de los SAH de dicha área, con el fin de contribuir a la generación de alternativas de conservación.

- **Objetivo General**

Determinar el valor económico del servicio de provisión de agua del páramo ubicado en el área contigua al Bosque Protegido Cubilan, provincia del Cañar.

- **Objetivos Específicos**

- Determinar la extensión actual de la cobertura de páramo actual en el área de estudio.
- Estimar el costo de oportunidad de la ganadería vacuna con base a revisión bibliográfica.
- Calcular la oferta hídrica disponible en el área de estudio.
- Determinar el valor económico del servicio de provisión de agua para el páramo previamente identificado.

CAPÍTULO I

1. VALORACIÓN DE SERVICIOS AMBIENTALES DE LOS PÁRAMOS

1.1. Los Páramos

Son ecosistemas que se extienden desde la Sierra Nevada de Santa Marta en Colombia y la cordillera de Mérida en Venezuela, hasta la depresión de Huancabamba en Perú. En su mayoría se encuentran presentes en la cordillera de los Andes; sin embargo, también se los puede encontrar en América Central, en Costa Rica y Panamá (Vásconez & Hofstede, 2006). Geográficamente es común encontrarlos a grandes alturas, que pueden superar los 4.000 msnm, pero también existe páramo a alturas tan bajas como los 2.800 msnm. En cuanto al clima, la temperatura es baja y se da estacionalidad diaria (diferencias marcadas entre el día y la noche), también existe gran incidencia de neblina y mucha irradiación solar (Vásconez & Hofstede, 2006). Este clima extremo ha generado que los seres vivos tengan que adaptarse a condiciones adversas, pero a pesar de ello, éste es el ecosistema de montaña más biodiverso del mundo, donde se pueden encontrar especies vegetales (en su mayoría arbustos, pastizales y almohadillas), anfibios, aves y mamíferos de poco tamaño (Hofstede, 2014).

La precipitación en estos ecosistemas puede tener una media de 3.000 mm/año, pero comúnmente bordea los 1.000 mm/año. Todas estas características bioclimáticas (bajas temperaturas, alta nubosidad y gran cantidad de precipitación), añadidas a las propiedades de los suelos del páramo que retienen gran cantidad de agua, hacen que se genere un alto rendimiento hídrico en estos ecosistemas (Hofstede, 2001).

1.2. Bienes y servicios ambientales de los Ecosistemas

Los ecosistemas son capaces de proveer bienes (derivados de su estructura) a las sociedades humanas, entre los que tenemos: especies de interés comercial, recursos pesqueros, ganaderos, agrícolas, forestales, entre otros (Lomas et al., 2005). Sin embargo, a través de su funcionamiento, estos mismos ecosistemas son capaces de proveer servicios ambientales, como: el abastecimiento de agua, la depuración de residuos, la fertilidad del suelo, la polinización, el placer estético del paisaje, etc. Estos servicios que son vitales para los ecosistemas, también son importantes para la economía, y en muchos casos están debidamente valorados y estudiados, como en el turismo asociado a las áreas protegidas (Lomas et al., 2005). A pesar de ello existen otros servicios que son infravalorados y por ello tienen poco peso en las decisiones políticas o económicas que los afectan (Lomas et al., 2005).

La importancia de mantener estos servicios ambientales se puede evidenciar cuando se obtienen cifras aproximadas de su valor económico. Por ejemplo en Costanza et al., 1997 se estima que todos los servicios ambientales del planeta tienen un valor aproximado a 33 trillones \$/año, que supera por mucho el PIB mundial (18 trillones \$/año). Además, se estima que cada año la economía del mundo tiene que aportar cerca de 250 billones de dólares debido a la pérdida de los servicios ambientales (que son generados por la naturaleza de forma gratuita), y que también solamente son necesarios 50 billones de dólares por año para proteger los servicios ambientales que son capaces de generar cinco trillones de dólares al año (Lomas et al., 2005).

1.3. Servicios ambientales hidrológicos del páramo

Según Célleri (2010) los servicios ambientales más importantes generados por el páramo son los hídricos, que incluyen: la regulación del ciclo hidrológico, la generación de altos rendimientos hídricos, mantenimiento de la calidad del agua (ausencia de contaminantes, y con poca o nula cantidad de sedimentos), y la recarga de acuíferos. Estos se derivan de las propiedades biofísicas de los páramos, que influyen en los caudales y la calidad del agua que sale de sus cuencas (Célleri, 2010).

El rendimiento hídrico observado en algunas microcuencas del sur del Ecuador llega al 67%, gracias a la gran capacidad de almacenamiento de los suelos del páramo (Andosoles), los cuales tienen un origen volcánico reciente (Célleri, 2010). Además, la baja evapotranspiración (influenciada por las bajas temperaturas y una humedad relativa alta), y las precipitaciones casi uniformes durante todo el año, también tienen un papel clave en dicho rendimiento. Los Andosoles poseen una estructura porosa que actúa como una esponja, reteniendo agua en las épocas lluviosas y liberándola en las épocas de estiaje, de esta forma ayudan a mantener uniformidad en los caudales de los cauces que alimenta. La saturación de este suelo puede llegar al 80%, un valor muy alto comparado con los de las cuencas bajas y medias que llegan al 30% y 40%. El régimen hidrológico y la generación de caudales en este tipo de ecosistemas están dominados por flujos subsuperficiales y mecanismos de exceso de saturación, esto último ocurre en los suelos saturados cercanos a los cauces (Célleri, 2010).

En algunos casos estos servicios se ven afectados por el cambio de uso de suelo, que sustituye al pajonal por pasturas para la ganadería o por tierras agrícolas. Esto puede generar, por ejemplo, que la calidad del agua disminuya debido a la erosión del suelo desprotegido (Llambí et al., 2012). En estos casos, debido a la dificultad de restaurar todos de los servicios ambientales hídricos (SAH) afectados, se debe optar por

rehabilitar el que tenga más importancia para la región, como: mantener un flujo base constante, disminuir caudales de crecida, disminuir la carga de sedimentos en los ríos, entre otros (Célleri, 2010).

1.4. Impactos de la actividad antrópica sobre el páramo

Las principales actividades antrópicas que afectan el páramo son: la agricultura, la ganadería, la forestación con especies exóticas (comúnmente pinos), la minería y el turismo. A estos se le suman el cambio climático, el cual es un fenómeno global que también afecta a otros ecosistemas (Llambí et al., 2012). Sin embargo, la actividad que más impacto genera, considerando la superficie que abarca, es la ganadería extensiva; sin dejar de lado a la agricultura, que también tiene un papel importante por la intensidad de sus impactos ecológicos y su importancia socioeconómica (Llambí, 2014). El cambio de uso de suelo del páramo a plantaciones de pino y suelos agrícolas, puede provocar una fuerte disminución en la producción de agua y en la capacidad de regulación hídrica de los suelos, mientras que el pastoreo extensivo puede llegar a ser sostenible, si se controla la capacidad de carga de animales y la intensidad de las quemas (Llambí et al., 2012).

La labranza puede provocar un daño irreversible en los suelos de los páramos, destruyendo su capacidad de retención de agua, mientras que el pastoreo con ovejas, puede generar una reducción del 40% del carbono del suelo y la generación de agregados del suelo hidrofóbicos. En cuanto al rol de la vegetación en el ciclo hidrológico, aparte de consumir muy poca agua, son importantes en la intercepción de garúa y la regulación del microclima (Célleri, Cisneros, & Buytaert, 2012).

1.5. Ganadería en el páramo

A pesar de que no se conoce con exactitud la capacidad de carga animal del páramo, se sabe que en los Andosoles (suelo característico de este ecosistema) la infiltración es muy alta, y que esta se ve afectada por la ganadería (Vargas, 2013). Para el caso de la ganadería intensiva o extensiva, el pisoteo del ganado provoca un aumento de la densidad aparente del suelo (que posee una resistencia mecánica baja), y su efecto directo es el deterioro de su capacidad de retención de agua (Morales-Betancourt & Estévez-Varón, 2006).. Se ha reportado que la conversión de pajonal a pino afecta de menor manera a la retención hídrica, que cuando se la ha cambiado a pastos (Célleri et al., 2012). La quema asociada a la ganadería, y el pisoteo de los animales, también afectan a esta propiedad del suelo (Vargas, 2013). Sumado a estos factores, se debe

considerar que la recuperación del páramo ha demostrado ser un proceso muy lento, lo que lo hace un ecosistema vulnerable a la actividad antrópica (Morales-Betancourt & Estévez-Varón, 2006).

1.6. Economía ambiental y Valor económico total

La Economía ambiental es una rama de la economía, surgida del esfuerzo por conciliar esta ciencia con la ecología, y así abordar de mejor forma la crisis ambiental por la que está pasando el planeta. Lo que la diferencia de la economía ecológica (otra rama que busca el mismo propósito) es su enfoque, que busca otorgar un valor económico a los bienes y servicios generados por los ecosistemas, que no han sido reconocidos en los sistemas de mercado (Azqueta, Dominguez, & O’Ryan, 2007). En definitiva, lo que se pretende es internalizar los efectos indirectos de una actividad de producción y/o consumo, para que compitan por igual con otros bienes en el mercado. Por otro lado, la economía ecológica considera que las actividades humanas deberían sujetarse a los principios y límites de la ecosistemas, por lo que la economía toma un papel secundario en la toma de decisiones (Azqueta, Dominguez, & O’Ryan, 2007)

Según la economía ambiental, los activos ambientales están compuestos por un conjunto de valores que generan un valor económico total (VET), y que estos pueden ser estudiados y analizados por separado. Se distinguen los valores de uso, que se refieren a los valores estimados por el precio que le dan los individuos vinculados a este bien o servicio; y los valores de no uso, en donde los usuarios deciden no transformar el medio natural. La suma de ambos valores da como resultado el VET. En la Tabla 1 se desglosan a breves rasgos los valores de uso y de no uso (Lomas et al., 2005).

Tabla 1. Desglose del Valor económico total

Valores de Uso			Valores de No uso	
Uso directo	Uso indirecto	Valor de opción	Valor de legado	Valor existencial
Productos directamente consumibles	Beneficios derivados de funciones ecosistémicas	Valores futuros (directos e indirectos)	Valores de uso y no uso del legado ambiental	Valor de conocer que todavía existe un componente del medio ambiente

p.e. plantas, animales de uso agropecuario, madera	p.e. Regulación hídrica, suelos, depuración de contaminación	p.e. Conservación de hábitats	p.e. Prevención de cambios irreversibles en hábitats	p.e. Hábitat, especies, genes
--	--	-------------------------------------	--	-------------------------------------

Fuente: Pearce & Moran, 1994

1.7. Valoración económica de servicios ambientales

Los esquemas de Pago por Servicios Ambientales (PSA) buscan promover la conservación de los ecosistemas, y los bienes y servicios que proveen. Estos esquemas consisten en procesos complejos, que comúnmente se adecúan a las condiciones de cada lugar (Wunder, Wertz-Kanounnikoff, & Moreno-Sánchez, 2007). Uno de los procesos clave en este esquema es la valoración económica de un bien o servicio ambiental (SA), que se relaciona directamente con la disposición a pagar de los usuarios. La finalidad de un esquema PSA es que los beneficiarios externos de los SA paguen de manera directa a los propietarios y usuarios locales, con el fin de estos adopten prácticas que promuevan la conservación y manejo sustentable de los ecosistemas que los proveen (Wunder, Wertz-Kanounnikoff, & Moreno-Sánchez, 2007).

Las clasificaciones de los métodos de valoración económica varían según el autor; sin embargo, se las puede dividir en dos grandes grupos: Los métodos de preferencias relevadas, que se basan en información de mercado y se orientan mayormente hacia estudios de costo-beneficio; y los métodos de preferencias enunciadas, en donde la información se obtiene a través de encuestas. Dentro de los métodos de preferencia revelada se encuentran los métodos de precios hedónicos, los de función familiar (costos de viaje y de oportunidad) y los de función de producción de utilidad (Wunder, Wertz-Kanounnikoff, & Moreno-Sánchez, 2007).

1.8. Método del Costo de Oportunidad

Los análisis de costo-beneficio buscan expresar en términos monetarios los beneficios que se obtienen por los bienes y servicios generados por un ecosistema, y una de las metodologías que se utilizan para obtener dicho valor es el método de costo de oportunidad (Castro, 2011). Este método aplicado a los bosques indica que su productividad (uno de sus servicios ambientales) debe ser compensada por la sociedad, de forma de que el dueño de la tierra o usuario directo de ésta, considere más rentable el conservar el bosque que continuar con las actividades que realizaba allí (Barrantes &

Vega, 2001). Este método es adecuado para valorar la provisión de agua, debido a que comúnmente este servicio no se estima por la demanda sino por un precio fijado por la empresa proveedora, y por ello sería más adecuado valorarlo en función de la actividad que compite con el uso de suelo y no por la demanda de este servicio. En el caso del páramo las actividades que suelen competir con el uso de suelo (conservación o manejo sostenible) son comúnmente la ganadería y la agricultura (Barrantes & Vega, 2001).

2. OFERTA HÍDRICA

2.1. Ciclo hidrológico y balance hídrico

El ciclo hidrológico es un proceso global referido al movimiento del agua de un lugar a otro, que va hacia la atmósfera por evaporación, y hacia la superficie terrestre por la precipitación, esta posteriormente se convierte en escorrentía superficial y subterránea (García, Martínez, & Vidriales, 2003). Dicho movimiento se produce gracias a la energía del sol, que provee de suficiente energía a este líquido para que se evapore de un cuerpo de agua superficial (o del suelo) y luego se precipite, en este último caso un factor importante es la gravedad (Schulz & García, 2015).

En balance hídrico es una ecuación de continuidad (ec. 1) basada en el principio físico de conservación de masas, que puede expresarse de manera muy simple. Sin embargo, la cuantificación de cada uno de sus términos puede ser difícil de obtener debido a la falta de mediciones en campo y a otros factores que varían dependiendo del lugar, como la evapotranspiración, la recarga de acuíferos y las variaciones del agua almacenada en la cuenca. Para simplificar estos cálculos se asume que las variaciones de agua de la cuenca son despreciables o que ésta actúa como una superficie impermeable (Schulz & García, 2015).

$$E - S = \Delta V \quad (\text{ec. 1})$$

Donde,

E Entradas

S Salidas

ΔV Variación del almacenamiento

2.2. Oferta hídrica superficial

Representa el volumen de agua que escurre por la superficie e integra los sistemas de drenaje superficial, se expresa en unidades de tiempo anuales o mensuales en

condiciones hidrológicas promedio, húmedas y de año típico seco. Esta variable depende directamente del régimen de precipitación y la energía irradiada del sol sobre la superficie. Existe una ecuación simplificada del balance hídrico (ec. 2), la cual puede ser aplicada para la obtención de la escorrentía hídrica superficial, siempre y cuando el área de estudio sea extensa, y se asuma que para periodos largos de tiempo los cambios de almacenamiento tienden a minimizarse al punto de ser despreciables (Sánchez, García, Jaramillo, & Verdugo, 2010).

$$ESC = P - ETR \quad (\text{ec. 2})$$

Donde,

ESC Escorrentía hídrica superficial (mm)

P Precipitación (mm)

ETR Evapotranspiración

2.3. Precipitación media de una cuenca

La precipitación es un componente muy importante en el ciclo hidrológico, principalmente porque la biota de la superficie terrestre depende de este recurso. Ésta se genera cuando las masas húmedas de la atmósfera se enfrían lo suficiente como para llegar a su punto de saturación (Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, 2009). En las estaciones meteorológicas, que proveen de datos climatológicos a lo largo del año, se utilizan comúnmente pluviómetros o pluviógrafos que registran la precipitación de un punto específico. La estimación de la precipitación, para una red pluviométrica con estaciones dispersas, es válida para áreas extensas de terreno (Segerer & Villodas, 2006).

Para la estimación de este parámetro hidrológico, se necesitan obtener y analizar series, para períodos de tiempo de entre 25 a 30 años, proveídos por las estaciones meteorológicas disponibles en el área de estudio. Para la obtención de la precipitación media se pueden emplear tres metodologías: media aritmética, polígonos de Thiessen y el de Isoyetas (Carrera-Villacrés et al., 2016). La media aritmética es el más simple de los tres, en esta se obtiene el promedio aritmético de la lluvia registrada por todas las estaciones; se recomienda utilizarla en zonas planas, con estaciones distribuidas uniformemente, con elevado número de pluviómetros y un gradiente de precipitación menor al 10%. Los polígonos de Thiessen ponderan el valor de precipitación de cada

estación, en función de su área de influencia, la cual se calcula según por medio de polígonos. Por último, el método de las Isoyetas consiste en la generación de isolíneas que junten las estaciones meteorológicas a utilizar, con el fin de generar un plano de la distribución real de la precipitación dentro de la cuenca. En la Figura 1 se encuentran gráficamente los resultados generados por el método de polígonos de Thiessen y por el de Isoyetas.

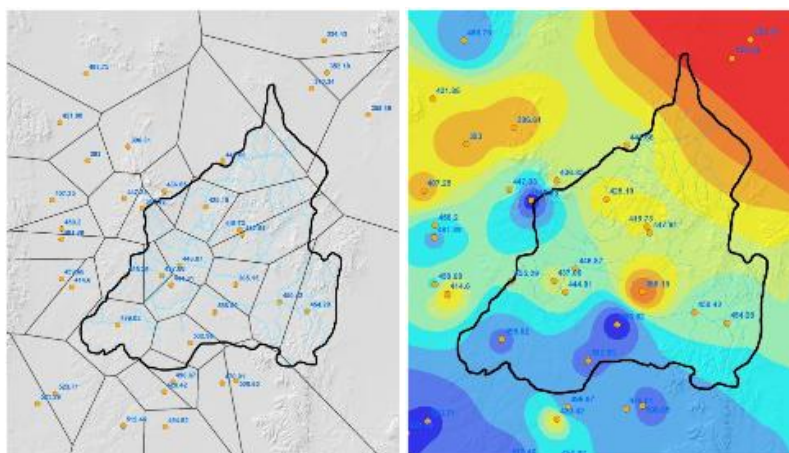


Figura 1. Resultados gráficos del método de polígonos de Thiessen (izq.) y el de Isoyetas (der.)

Fuente: SAGARPA, 2004

2.4. Evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) es la combinación de dos procesos: la evaporación que se refiere a la pérdida de agua en las superficies (como lagos, suelo, ríos, etc.), y la transpiración por parte de la vegetación. En la evaporación el factor clave es la radiación solar, que provee de suficiente energía a las moléculas de agua para pasar de estado líquido a gas. Otros parámetros climatológicos que intervienen son la humedad atmosférica, temperatura del aire y la velocidad del viento. En la transpiración, el agua contenida en los tejidos de las plantas se libera a través de las estomas, que son pequeñas aberturas en las hojas de las plantas que permiten el intercambio de gases entre ésta y la atmósfera; este factor varía dependiendo de la especie (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

Tal como en el caso de la transpiración los factores que influyen a la evapotranspiración son el aporte de energía, el gradiente de presión de vapor y la velocidad del viento (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006). Sin embargo, la transpiración y la evaporación ocurren de manera simultánea y son muy difíciles de distinguir, por esta razón se los estudia en conjunto. En el caso de los cultivos, cuando éstos son jóvenes

los procesos de evaporación son predominantes, mientras que cuando el dosel llega a cubrir toda la superficie del suelo, predomina la transpiración. La unidades en que se expresa la ET es en milímetros (mm) por unidad de tiempo, pudiendo expresarse este último en días, meses o años (Allen et al., 2006).

2.5. Evapotranspiración potencial y de referencia.

La Evapotranspiración potencial (ETP) es aquella que se produciría si la humedad del suelo y la cobertura vegetal estuvieran en condiciones óptimas, por lo que llegaría a ser menor o igual a la evapotranspiración real (que difiere para cada caso). Sin embargo, este concepto era un tanto ambiguo, ya que cada vegetación tiene una evapotranspiración distinta, por lo que se incorporó el concepto de evapotranspiración de referencia (ET_r) (Sánchez, 2006), que es la generada por una superficie de referencia en óptimas condiciones de crecimiento y con un suministro de agua adecuado. Este concepto se introdujo para estudiar la demanda evaporativa de la atmósfera independientemente del tipo de cultivo, su estado de desarrollo y de su manejo. El cultivo de referencia recomendado en el Manual de la FAO56 es una pradera de gramíneas, pero también puede llegarse a utilizar alfalfa. A pesar de la distinción, en hidrología estos dos conceptos son intercambiables, por lo que ambos cálculos son válidos (Santos et al., 2007).

2.6. Métodos de estimación de la evapotranspiración

La ETP puede determinarse en campo mediante tanques de evaporación, los cuales poseen una superficie de agua de poco tamaño, o pueden evaluarse con evaporímetros o lisímetros, que poseen una superficie porosa embebida en agua (UNICEN, 2003). En el caso de los tanques de evaporación existe la desventaja de que los registros de ETP pueden ser afectados por el hecho de que estos continúan funcionando durante la noche (Llanes, 2014). Comúnmente para estimar la evapotranspiración real se utilizan métodos de distinta complejidad, que utilizan variables climáticas como la temperatura, velocidad del viento y radiación solar. Las fórmulas empíricas más sencillas utilizan la medida de la temperatura, como los modelos de Thornthwaite y Blaney (1948), Criddle (1950), y Holdridge (1978). Los métodos de Priestly-Taylor (1972) y Jensen-Haise (1963) incorporan la radiación solar al cálculo; sin embargo, las ecuaciones de mayor complejidad utilizan el balance energético en combinación con el transporte convectivo del vapor de agua, como la ecuación de Penman-Monteith, Anton, Montero y Muñoz (2003), y Stefano y Ferro (1997). En la Tabla 2 se describen las ventajas y desventajas de los métodos comúnmente utilizados (Lavao, 2016).

Tabla 2. Métodos para calcular la ETP

Método	Ventaja	Desventaja
Penman (FAO)	Provee resultados satisfactorios	La fórmula contiene muchos componentes, lo que complica los cálculos
Bradley-Criddle	Fácil de usar y los datos suelen estar disponibles	El coeficiente de cosecha depende mucho del clima
Thornwaite	Es confiable para términos largos	Subestima la ET durante tiempo lluvioso.
Holdridge	Es muy fácil de usar y requiere solamente de la temperatura media y precipitación media	Válida solo para regiones tropicales y subtropicales. Para altas elevaciones necesita de un ajuste
Jensen-Haise	Bajo condiciones atmosféricas tranquilas es confiable	Subestima la ET bajo condiciones de alto movimiento de masas de aire atmosférico
Hargreaves y Samani	Solo requiere datos de temperatura máxima y mínima.	Necesita ser evaluada en muchas localidades para su aceptación.
Prestly-Taylor	Confiable en áreas húmedas.	No es adecuado para zonas áridas

Fuentes: Llanes (2014), y Vega & Jara (2007)

3. TELEDETECCIÓN

3.1. Geomática

Esta ciencia se podría definir como un conjunto de técnicas y metodologías de adquisición, almacenamiento, procesamiento, análisis, presentación y distribución de información geográficamente referenciada; en donde se involucran técnicas de distintas disciplinas como: la geodesia, topografía, cartografía, teledetección o percepción remota, la fotogrametría, la geoestadística o análisis espacial, los Sistemas de

Posicionamiento Global de Navegación por Satélite (GPS) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Gómez, 2009).

3.2. Teledetección

La teledetección, también conocida como percepción remota, se refiere a la adquisición de información de un objeto ubicado cerca o sobre la superficie terrestre, sin la necesidad de estar en contacto con este. Comúnmente el sensor (el cual detecta y registra dicho objeto) se encuentra a una distancia considerable, y la forma en que la información llega a este es por medio de la radiación electromagnética emitida por el objeto o generada por el sensor. En definitiva, se refiere a plataformas aéreas y satelitales capaces de detectar dicha radiación (Gómez, 2009).

3.3. Radiación electromagnética

La Teledetección se genera a partir de la interacción entre las coberturas terrestres (clasificadas en grandes rasgos como suelo, agua y vegetación) y un flujo de energía denominado radiación electromagnética, este fenómeno físico es explicado por la teoría cuántica y la teoría ondulatoria. En esta última, la radiación electromagnética es estudiada como un fenómeno ondulatorio de propagación en donde los campos que actúan en este son el electromagnético y el eléctrico (Pérez & Muñoz, 2006). El espectro electromagnético (ver Figura 2) viene a ser la agrupación de todos los tipos de energía radiante, las cuales varían por su longitud de onda.

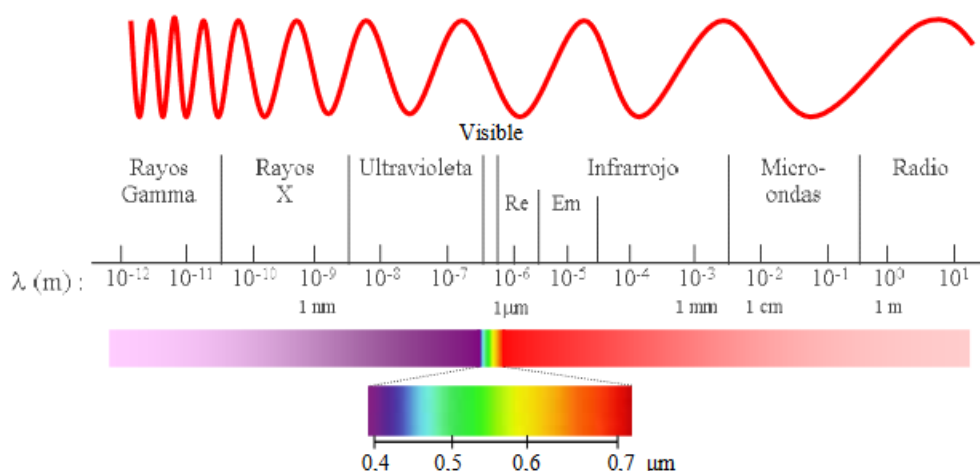


Figura 2. Espectro electromagnético.

Fuente: Hernández & Montaner, 2009

El espectro que puede ser detectado por los seres humanos se llama radiación visible, y se encuentra aproximadamente en la mitad del espectro electromagnético (de los 400 a los 700 μm) (Gómez, 2009). Otras regiones del espectro tienen usos en teledetección, como el infrarrojo medio, que se utiliza para detectar el índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), con el fin de identificar la presencia de estrés hídrico en la vegetación (Hernández & Montaner, 2009).

3.4. Radiancia y Reflectancia

Es el flujo de energía (principalmente energía irradiante o incidente) emitida desde una superficie hasta otra, en una dirección en particular y siguiendo un ángulo sólido, se expresa en Vatios por estereorradián por metro cuadrado $W/sr^{-1}/m^2$ (Congedo, 2014). Cuando se habla de radiancia espectral, nos referimos a una porción específica del espectro electromagnético. La reflectancia (o albedo) es el flujo de energía que refleja la superficie reflectora, se expresa de forma adimensional. Cada superficie tendrá un valor de reflectancia diferente, y su valor es adimensional (Congedo, 2014).

3.5. Firmas espectrales

La radiación electromagnética que incide sobre los elementos de la superficie terrestre (luego de haber sufrido procesos de absorción, dispersión y reflexión en la atmósfera), y se refleja en función a las características de la superficie. Cuando ésta es rugosa actúa como un reflector especular, y cuando es suave como un reflector Lambertiano (Gómez, 2009), con esto nos referimos a la reflectancia espectral, la cual también depende de la longitud de onda de la radiación electromagnética que incide sobre el objeto (ver Figura 3). A las curvas generadas se los denominan espectros, signatures o firmas espectrales (Gilabert, Gonzalez-Piqueras, & García-Haro, 1997).

Reflectancia (%)

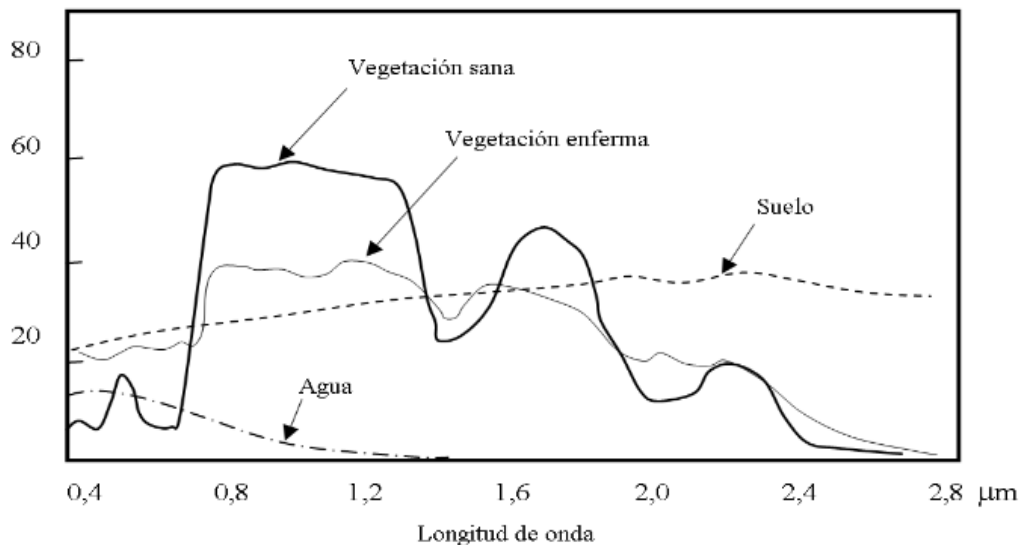


Figura 3. Firmas espectrales típicas para vegetación, suelo y agua, en el rango visible e infrarrojo reflejado del Espectro electromagnético.

Fuente: Hernández & Montaner, 2009

3.6. Componentes de un sistema de teledetección

Los tres elementos principales de un sistema de teledetección son: el sensor, el objeto y el flujo energético. Dicho flujo puede ser generado por el objeto o por el sensor, así es que se puede obtener información sobre un objeto por reflexión, emisión o emisión reflexión (Instituto Geográfico Agustín Codazzi & IGAC, 2007). La fuente de radiación comúnmente utilizada es la radiación proveniente del sol (utilizada por los sensores pasivos), el cual se comporta de forma muy similar a un cuerpo negro, y que genera un máximo de longitud de onda ($500 \mu m$) a una temperatura de $6000^\circ K$ (grados Kelvin) (Gómez, 2009). También pueden existir sensores activos, que generan su propio flujo energético que será reflejado por el objeto de estudio. En una concepción más amplia se pueden incluir los siguientes elementos en un sistema de teledetección (ver Figura 4):

- Fuente de energía. – Puede provenir del sensor o generada naturalmente (sol)
- Cubierta terrestre. – A grandes rasgos se refieren a las cubiertas como agua, suelo, y vegetación.
- Sistema Sensor. – Son los sistemas encargados de receptar la señal electromagnética (reflejada o emitida) por el objeto de estudio. Existen sensores activos como el radar y el lidar, y pasivos como cámaras de fotos y los radiómetros. Los sensores remotos comúnmente se encuentran emplazados en satélites o aviones (Sobrino, 2001).

- Sistema de recepción y comercialización. – Recibe la información transmitida por el sistema sensor, y la guarda para su posterior procesamiento.
- Intérprete o analista. – Se encarga de generar información temática en función de las imágenes obtenidas.
- Usuario final. – Es aquel que recibirá la información procesada y le dará un uso (Instituto Geográfico Agustín Codazzi & IGAC, 2007).

3.7. Resolución de un sensor

Existen cinco tipos de resolución de un sensor, éstas son: la resolución espacial que se refiere al tamaño del objeto más pequeño que puede ser distinguido en una imagen (tamaño de píxel), la resolución radiométrica que es la capacidad del sensor de discriminar niveles o intensidades de distancia, la resolución espectral que indica al número y anchura de las bandas espectrales que puede distinguir el sensor, resolución temporal que es el tiempo de paso del satélite sobre la vertical de un punto, y la resolución angular que se refiere a la capacidad de un sensor de tomar imágenes oblicuas (Pérez & Muñoz, 2006).

3.8. Principales programas de percepción remota

Las misiones de observación de la Tierra, desarrolladas desde finales de los años setenta, generaron programas con propósitos distintos, como el uso de sensores para estudios meteorológicos, ambientales (LANDSAT, Terra, SPOT), oceanográficos (SEASAT, OKEAN), geológicos, entre otros. Y gracias al desarrollo actual, algunos de ellos trabajan con satélites de alta resolución, que pueden generar imágenes con tamaños de píxel menores a un metro. Dentro de estos programas se manejan sensores que orbitan la tierra desde grandes distancias como los geoestacionarios (3.000 Km) y los heliosíncronos que se encuentran más cercanos a la superficie (1.000 Km) (Pérez & Muñoz, 2006).

3.9. Aplicaciones de la teledetección

Las imágenes satelitales adquiridas por medio de los sensores pueden ser utilizadas con diferentes fines (ver Tabla 3). Por ejemplo, las bandas del infrarrojo cercano sirven para observar cambios en la extensión y el estado de salud de la vegetación, y pueden ser usadas también para distinguir entre distintos tipos de vegetación. En cuerpos de agua, con estas imágenes se puede estimar la profundidad de cuerpos de agua

someros, mientras que en el mar se pueden estimar concentraciones de fitoplancton a través del aumento de la reflectancia, causada por la presencia de clorofila en el espectro comprendido entre 0,4 y 0,5 μm . A nivel atmosférico se puede utilizar con el fin de generar parámetros de predicción del tiempo, en función del movimiento y delineamiento de nubes (Gómez, 2009).

Tabla 3. Aplicaciones de la teledetección en función de las bandas espectrales.

Banda espectral [μm]	Aplicaciones
0,4 – 0,5	Mapeo de la distribución de clorofila y aguas costeras; discriminación entre árboles perennifolios y caducifolios; determinación de tipos de suelos.
0,5 – 0,6	Batimetría; monitoreo de sedimentos marinos y salud de la vegetación.
0,6 – 0,7	Discriminación entre especies vegetales; mapeo geológico y aspectos culturales.
0,7 – 0,8	Levantamiento de biomasa; mapeo y monitoreo de vegetación; discriminación de la frontera agua/tierra.
0,8 – 1,1	Mapeo de vegetación.
1,6 – 1,8	Medición del contenido de humedad de la vegetación; discriminación entre nubes y nieve.

Fuente: Gómez, 2009

Una de las aplicaciones más destacadas de la percepción remota es la identificación de coberturas de suelo, por medio de la utilización de algoritmos de clasificación supervisada y no supervisada, basados en regiones de interés (ROI). Los mapas de uso de suelo generados son de suma utilidad para la planificación y gestión territorial hoy en día (García, Rogel, & Pérez, 2004).

4. CLASIFICACIÓN DE COBERTURAS

4.1. Comportamiento espectral de la vegetación

La reflectancia de la vegetación se encuentra en función de la estructura de las hojas, tipos de pigmentos y el contenido de humedad, y cada uno de estos aspectos se comporta de distinta manera en el espectro electromagnético. Por ejemplo, los

pigmentos como la clorofila, carotenos y la xantofila afectan a las longitudes de onda del espectro visible (0,4 a 0,7 μm) (Hernández & Montaner, 2009), en donde la mayor parte de la radiación es absorbida por la clorofila; por sus valores mínimos en la banda azul y rojo, presenta un color verde-amarillento (Sobrino, 2001). La estructura de las hojas aumenta la reflectividad en la zona del infrarrojo cercano (0,8 a 1,1 μm), mientras que el contenido de agua de las hojas afecta la reflectividad en el infrarrojo medio (1,4 a 1,8 μm) (Hernández & Montaner, 2009).

4.2. Fotointerpretación

Con la finalidad de extraer información de las imágenes satelitales, éstas se pueden someter a una interpretación visual, que se refiere a la habilidad que poseen los humanos para distinguir y relacionar colores, patrones y tonalidades que aparecen en dichas imágenes. Sin embargo, también existen otros métodos, que por medio de un ordenador realiza clasificaciones automáticas y semiautomáticas de las imágenes. En ambos casos el criterio y la experiencia del interprete serán importantes para la identificación correcta de los objetos analizados (Pérez & Muñoz, 2006).

El proceso de fotointerpretación se puede dividir en las siguientes fases:

- Detección, reconocimiento e identificación. – Lo primero que se realiza es la detección de las coberturas en la imagen, para posteriormente identificarlas y hacer su verificación en campo.
- Preprocesamiento. – En esta fase se aplican distintas técnicas para mejorar la distinción entre los componentes de la imagen, como el uso del falso color, que destacan algunos aspectos de las bandas rojo, verde y azul (Rodríguez & Sánchez, 2015).
- Clasificación. – Con el fin de distinguir las coberturas, se asignan nombres a cada una de ellas, y se las delimita manualmente o por medio de un algoritmo. Para las clasificaciones automáticas es necesario obtener regiones de interés (por sus siglas en inglés ROI, Regions Of Interest).
- Análisis. – Se refiere más a un componente que a una fase, ya que en cada paso de la clasificación se necesitan tener observaciones basadas en información de otras fuentes o inferencias del intérprete para obtener los mejores resultados (Pérez & Muñoz, 2006).

Para la clasificación de uso de suelo se sigue un proceso muy similar; sin embargo, comúnmente se utilizan algoritmos de clasificación automática y semiautomática, con la

ayuda de SIG (Sistemas de Información Geográfica). Entre los softwares utilizados para este fin, tenemos al Erdas, QGIS, ArcGIS, ENVI, entre otros (Pérez & Muñoz, 2006).

4.3. Pre-procesamiento de imágenes satelitales

Se refiere al tratamiento digital previo de las imágenes, que busca corregir errores generados durante su obtención. Entre los errores que podemos encontrar están: fallos en los sensores (generan píxeles incorrectos), alteraciones generadas por el movimiento del satélite y el mecanismo de captación (producen distorsiones), y los errores producidos por la interferencia de la atmósfera (Universidad de Murcia, 2003).

Los pre-procesos utilizados para para corregir estos errores son, respectivamente: las correcciones radiométricas, las geométricas y las atmosféricas. En las correcciones radiométricas se busca recuperar píxeles perdidos, y también se aplica el bandeo para corregir bandas que están más claras u oscuras que las demás (Universidad de Murcia, 2003); mientras que en las correcciones geométricas se buscan corregir las distorsiones causadas por la inclinación del sensor y la influencia del relieve, en este caso se suelen utilizar Modelos digitales de terreno como insumo para la corrección (Instituto Geográfico Agustín Codazzi & IGAC, 2007).

En el caso de las correcciones atmosféricas, lo que se busca es recuperar la radiancia intrínseca del objeto capturado por el sensor, por lo que primero se realiza la transformación de los Niveles Digitales (ND) de cada banda a valores de radiancia, para luego transformarlos a valores de reflectividad en el techo de la atmósfera (por sus siglas en inglés TOA) (Aguilar, Mora, & Vargas, 2014).

4.4. Método de DOS1

El método de sustracción de objetos oscuros (DOS), también conocido como el método de Chávez, se utiliza para realizar correcciones atmosféricas en imágenes satelitales; es decir intenta eliminar el efecto de la dispersión de la radiación electromagnética originada por los gases y partículas de la atmósfera. Para ello se identifican los niveles ND más bajos de una banda, y se asume que estos valores se dieron debido a la dispersión atmosférica, esta información luego es utilizada para calibrar la imagen. Al final, estos valores se convierten en radiancia mediante ecuaciones que utilizan información extraída del metadato (archivo que contiene información sobre la imagen satelital, como el ángulo de elevación, nubosidad, resolución temporal, etc.) (Chuvieco & Salas, 2000).

4.5. Sistemas de clasificación

Los sistemas de clasificación tienen el objetivo de agrupar píxeles de varias bandas de imágenes satelitales, a partir de los valores radiométricos de cada píxel (ND). Lo que hacen es asignar cada píxel de la imagen a una de las clases previamente determinadas, con la ayuda de algoritmos y en algunos casos con sitios de entrenamiento o regiones de interés (ROI). Los métodos utilizados se dividen en dos grupos: el supervisado, que reconoce patrones basándose en la generación de regiones ROI (obtenidos en visitas de campo); y el no-supervisado que no requiere reconocimiento previo de la zona de estudio. Este último genera conjuntos de píxeles sólo basándose en las características espectrales de la imagen, a diferencia de la clasificación supervisada, que es un proceso semiautomático que también depende del criterio y la experiencia del analista (Macedo, Pajares, & Santos, 2010)

En el proceso de clasificación supervisada (Figura 5), la selección de ROI para cada una de las coberturas a identificar se debe elegir con la mayor precisión posible. Las categorías (coberturas) se pueden determinar en función de la cantidad de clusters identificados o a criterio del analista (Ayala & Menenti, 2001). Entre los clasificadores que comúnmente se utilizan tenemos: el método del paralelepípedo, mínima distancia y el de máxima probabilidad (Arozarena, 2001).

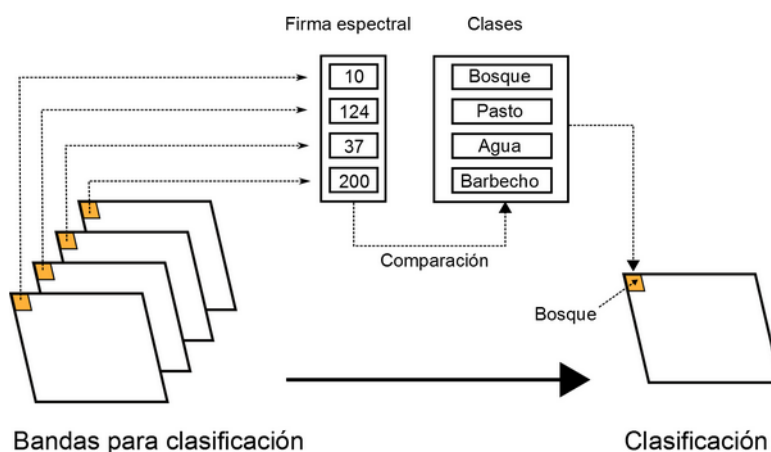


Figura 4. Esquema del proceso de clasificación supervisada.

Fuente: Olaya, 2015

4.6. Análisis estadístico de la clasificación de imágenes

Existen dos tipos de errores en mapas o imágenes clasificadas, los primeros son los errores temáticos (etiqueta) y los segundos son los errores geométricos (posición) en la delimitación de los polígonos o ubicación de los píxeles. Por esta razón es necesario

evaluar la confiabilidad de los mapas por medio de un análisis estadístico, que consiste en las siguientes etapas: diseño del muestreo, evaluación de sitios de verificación y análisis de los datos. En primera instancia se determinan el tipo de unidades de muestreo y el método de muestreo que ayude a seleccionar una porción representativa del área de estudio. Dentro de los tipos de muestreo tenemos al aleatorio simple, aleatorio estratificado, sistemático no alineado y el de conglomerados. En la evaluación de los sitios de verificación se evalúa la pertenencia de éste a determinada clase, comúnmente se llega a asociar cada dicho sitio a una categoría (Mas, Reyes, & Pérez, 2003).

Para el análisis de datos de confiabilidad se utiliza generalmente una matriz de confusión, en donde sus filas representan las clases de referencia y sus columnas las clases del mapa, mientras que la concordancia entre los sitios de verificación y la clasificación se observa en la diagonal. La confiabilidad del mapa se evalúa en función de la cantidad de puntos correctamente clasificados (Mas, Reyes, & Pérez, 2003). Otro de los métodos utilizados es el índice Kappa, que muestra la proporción de coincidencias obtenidas entre la clasificación y los sitios de verificación generados, dejando de lado aquellos que fueron generados de forma fortuita (Rodríguez & Sánchez, 2015).

CAPÍTULO II

5. METODOLOGÍA

5.1. Área de estudio

El bosque protector Cubilan es un área protegida ubicada entre los cantones de Biblián y Azogues, en la provincia del Cañar. Su extensión es de 902 *ha*, y posee una cobertura natural compuesta principalmente por bosque alto andino, matorral y una pequeña porción de páramo. El área de estudio posee 804,96 *ha* de extensión, se encuentra en la zona contigua a este bosque, la cobertura predominante es el páramo y el rango de altura va de los 3200 y 3600 msnm.

Esta zona se delimitó en función del área de recuperación natural establecida en el Plan de Manejo del Bosque Protector Cubilan del 2006, y tomando en cuenta la extensión de terreno (757,83 *ha*) que se deseó incorporar al área protegida en ese entonces (Fundación ECOHOMODE, 2006). El área de estudio se encuentra en la parte alta de las microcuencas de los ríos Cazhi, Aguilán y Tabacay (Fundación ECOHOMODE, 2006).

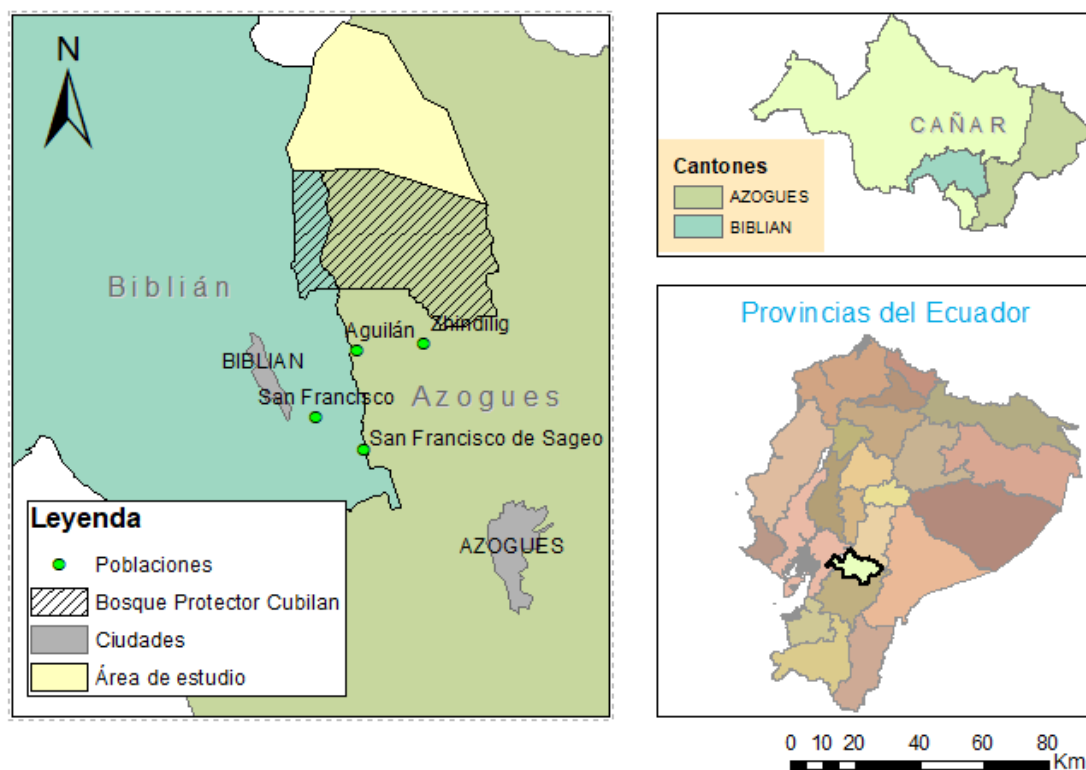


Figura 5. Ubicación del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia

5.2. Valoración económica del servicio ambiental

Para la valoración económica del servicio ambiental de provisión de agua se utilizó la metodología propuesta por Barrantes & Vega (2001), que valora el servicio hídrico con un enfoque de sostenibilidad en términos de calidad, cantidad y perpetuidad; y que considera el valor de productividad de la cobertura en función de la captación y la calidad de agua que produce. El enfoque de costo de oportunidad es válido cuando existen actividades que están compitiendo con la conservación del páramo, lo cual se evidencia en el área de estudio con el caso de la ganadería. La ecuación 3 se aplicó para estimar dicho valor económico.

$$VP = \frac{\alpha * CO * A}{Od} \quad (\text{ec. 3})$$

Donde,

<i>VP</i>	Valor de servicio de provisión de agua del páramo
α	índice de protección hídrica
<i>CO</i>	Costo de oportunidad de la ganadería
<i>A</i>	Área bajo cobertura de páramo
<i>Od</i>	Oferta hídrica en el área de estudio

5.3. Determinación del área bajo cobertura de páramo

5.3.1. Obtención de imágenes satelitales

Para la obtención de imágenes satelitales, que fueron utilizadas para la clasificación de coberturas y posterior cuantificación del páramo en el área de estudio, se recurrió al servicio EarthExplorer (earthexplorer.usgs.gov), en donde se obtuvieron imágenes nivel 1-C del satélite Sentinel-2A con fecha 23/01/2016. La cobertura de nubes de la imagen fue del 17%, y esta no cubrió el área de estudio.

Para la clasificación supervisada se utilizaron las bandas B02, B03 y B04; ya que con las bandas con mayor resolución (10m o 30m) no fue posible distinguir las coberturas. La banda B08 se excluyó debido a que se utilizó la combinación de color real (resultante de la mezcla de las bandas anteriormente mencionadas) para dicha clasificación.

5.3.2. Pre-procesamiento de imágenes

Las imágenes obtenidas fueron georreferenciadas en ArcGIS con ayuda de la cartografía 1:50.000 del IGM, y fueron cortadas con un polígono que delimita el área de estudio (ver Anexo 1), el cual fue generado teniendo como referencia a la zona de recuperación natural establecida en el Plan de Manejo del Bosque Protector Cubilan (Fundación ECOHOMODE, 2006). La extensión de terreno que abarca el polígono es de 804,96 *ha*. Todo el trabajo de preprocesamiento se realizó utilizando el datum UTM WG84 17S.

Debido a que las imágenes de nivel 1-C de Sentinel-2A tienen valores de reflectancia TOA escalados (lo que significa que para la conversión a TOA los píxeles de las bandas de 20m son separados en 4 píxeles de 10m cuyos valores son los mismos del pixel de 20m original) no necesitaron de orto-rectificación con un modelo digital de terreno (MDT) (Congedo, 2014). Sin embargo, sí se realizó la corrección atmosférica de las imágenes, por el método DOS1 (conocido también como el “Método de Chávez”), utilizando el Semiautomatic Classification Plug-in de QGIS.

5.3.3. Clasificación supervisada y post-procesamiento

Para la clasificación supervisada de la imagen pre-procesada, se utilizó el Semiautomatic Classification Plug-in de QGIS. Con la ayuda de Google Earth y las imágenes de Sentinel-2A, se identificaron zonas en donde se podrían obtener regiones de interés (ROI) (ver Figura 7), y se distinguieron las coberturas de: bosque de pinos, bosque nativo, cultivos, vía de segundo orden, páramo, y laguna (agua). Para confirmar la presencia de dichas coberturas e identificar más ROI, se realizó una visita de campo el día 23 de marzo del 2018 (ver Anexo 2, Anexo 3 y Anexo 4). Posteriormente se procedió a definir los ROI a ser utilizados y se realizó la clasificación supervisada por tres métodos (Máxima Probabilidad, Distancia Mínima y Mapeo del Ángulo Espectral), con el fin de establecer cuál de ellos genera mejores resultados.

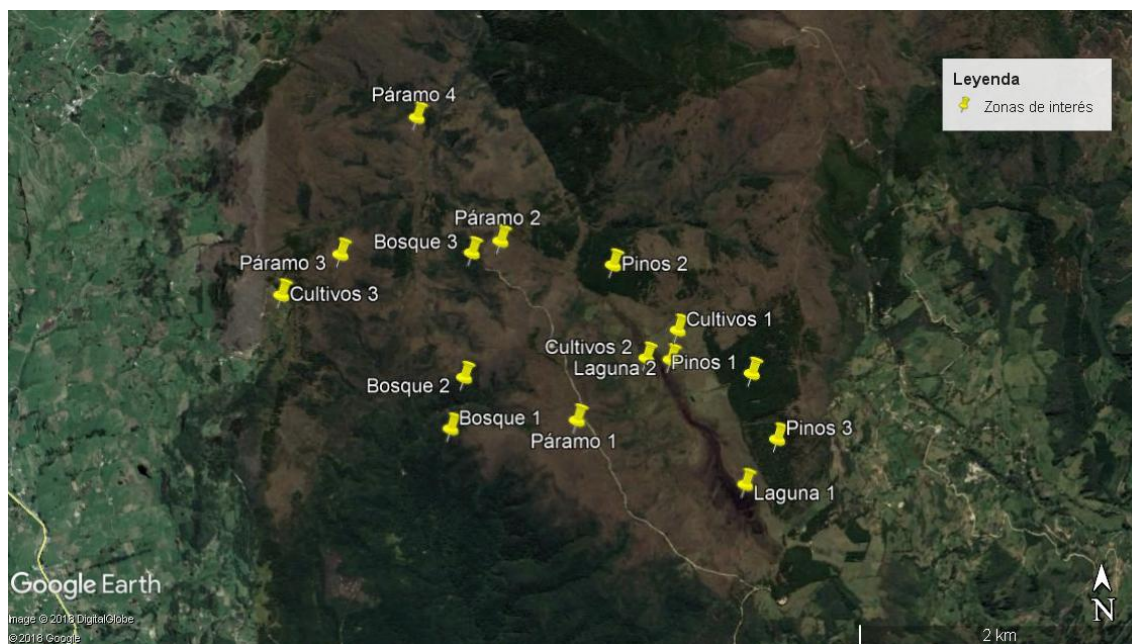


Figura 6. Zonas que se establecieron para la obtención de ROI.

Fuente: Elaboración propia

Para mejorar la clasificación de coberturas, se utilizó la herramienta de Majority Filter de ArcGIS, que eliminó los píxeles aislados (eliminación de ruido) del ráster obtenido. Adicionalmente se utilizó la herramienta “Editar Raster” del Semiautomatic Classification Plug-in de QGIS, para corregir manualmente algunas zonas en donde se generaron clasificaciones incorrectas.

5.3.4. Análisis estadístico de la clasificación

Para el análisis estadístico de la clasificación de coberturas se utilizó el Semiautomatic Classification Plug-in de QGIS. Primero se generaron ROI al azar con la herramienta “Creación de ROI múltiples”, que según la bibliografía recomienda trabajar con el 1% del área de estudio, y recomienda un área mayor para mejorar los resultados (Sobрино, 2001). Por esta razón se eligió trabajar con ROI de 25 píxeles de dimensión cada uno (la resolución de las imágenes de Sentinel-2A tiene es de $10 \times 10m$), esta dimensión se estableció debido al reducido tamaño del área de estudio, que no permite el uso de ROI de mayor tamaño sin que exista traslape. A partir de las regiones de interés generadas aleatoriamente, se utilizó la herramienta “Precisión” del plug-in de QGIS, con el fin de generar una matriz de confusión y así analizar la calidad de la clasificación.

5.4. Estimación de la oferta hídrica

5.4.1. Escorrentía superficial

Para la estimación de la oferta hídrica en el área de estudio se utilizó la ecuación del balance hídrico simplificada (ec 4), la cual es válida para un período largo de tiempo, y que requiere de registros precipitación y evapotranspiración media anual (Barrantes & Vega, 2001). La oferta hídrica es equivalente a la escorrentía.

$$ESC = P - ETR \quad (\text{ec. 4})$$

Donde,

ESC Escorrentía hídrica superficial

P Precipitación [mm]

ETR Evapotranspiración [mm]

Se seleccionaron 20 estaciones del INAMHI (ver Tabla 4 y Figura 8), ubicadas en las provincias de Azuay y Cañar, con registros de precipitación y temperatura media anual para el período de 1981-2010. Estos datos se utilizaron para la estimación de la evapotranspiración real y la determinación de la precipitación media en el área de estudio.

Tabla 4. Estaciones meteorológicas del INAMHI seleccionadas.

No.	Nombre	Tipo de estación	Código
1	Cañar	CP	M0031
2	Las Palmas	CP	M0045
3	Cuenca (Aeropuerto)	CO	M0067
4	Biblián	CO	M0137
5	Paute	CO	M0138
6	Gualaceo	CO	M0139
7	Ucubamba	CO	M0140
8	El Labrado	CO	M0141
9	Jacarín (Solano)	PG	M0197
10	Peñas Coloradas	PG	M0217
11	Ingapata	CP	M0222
12	Rio Mazar-Rivera	PV	M0410
13	Ingapirca	PV	M0411

14	Chanin	PV	M0414
15	Piscicola Chirimichay	PV	M0417
16	Ricaurte	PV	M0426
17	Sayausí	PV	M0427
18	Surucucho (Llulluchis)	PV	M0429
19	Sevilla de Oro	PV	M0431
20	Chanlud-Convenio	CP	M1111

***Climatología ordinaria (CO), climatología principal (CP), pluviografía (PG), pluviometría (PV)

Fuente: INAMHI, 2015

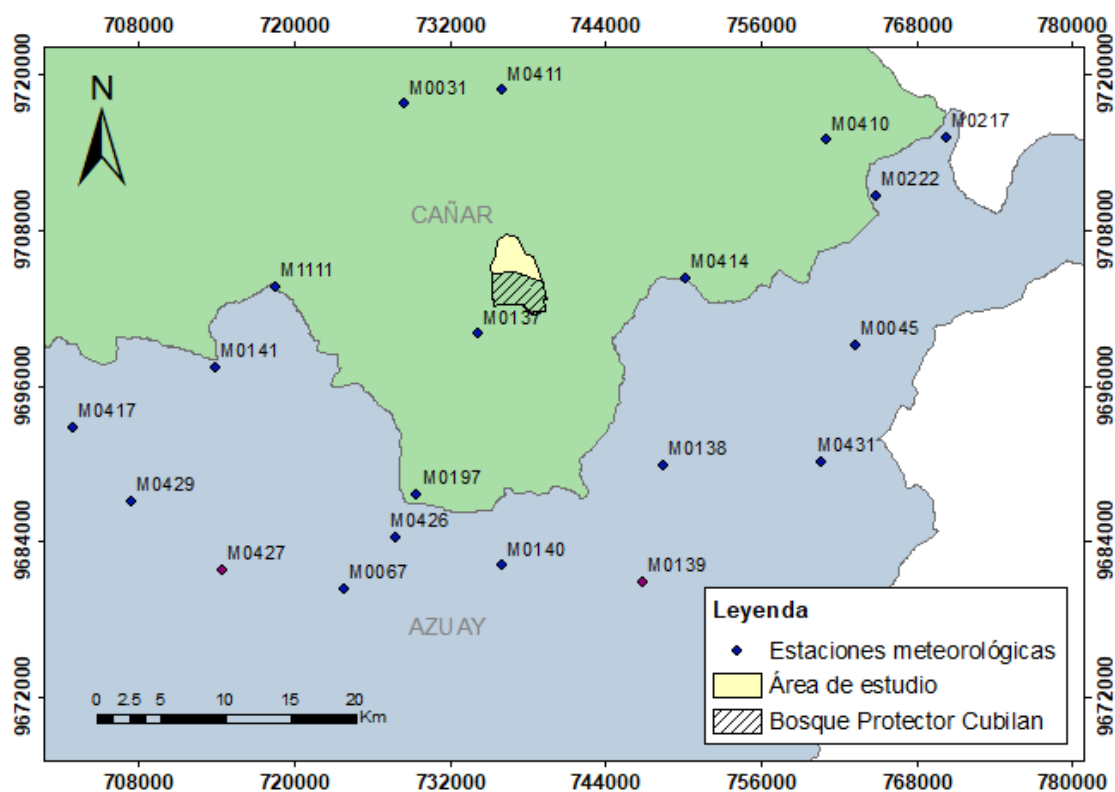


Figura 7. Localización de las estaciones meteorológicas seleccionadas.

Fuente: Elaboración propia

4.4.2. Precipitación media anual

Para la obtención de la precipitación media anual se utilizó el método de las Isoyetas, con los registros de 18, de las 20 estaciones meteorológicas seleccionadas. Las Isoyetas se generaron en ArcGIS, con la ayuda de las herramientas Spline y Contour, de la extensión 3D Analyst. Posteriormente se calculó el área comprendida entre cada par de Isoyetas, y se determinó la precipitación media con la ecuación 5 (SAGARPA, 2004).

$$D = \frac{\sum_i^n a_i * D_i}{A} \quad (\text{ec. 5})$$

Donde,

- D Precipitación media [mm]
 a_i Área entre cada dos Isoyetas [Km^2]
 D_i Promedio de precipitación entre dos Isoyetas [mm]

4.4.3. Estimación de la ET por el método de Holdridge

Holdridge, estableció que las variables necesarias para estimar la ET son la precipitación promedio y la biotemperatura, en donde se asume que en el rango de 0 a 30°C, ésta es igual a la temperatura ambiente (Vega & Jara, 2007). De allí se deriva la ecuación 6.

$$ETP = 58.93 * Tb \quad (\text{ec. 6})$$

Donde,

- ETP Evapotranspiración potencial [mm/año]
 Tb Biotemperatura media anual, equivalente a la Temperatura ambiente [°C]
58.93 Constante de ETP para $Tb=1^{\circ}C$

4.4.4. Temperatura ambiente

La temperatura ambiente (equivalente a la biotemperatura en nuestro caso) se obtuvo siguiendo la metodología planteada por Fries, Rollenbeck, Nauß, Peters, & Bendix (2012), la cual considera el gradiente altitudinal. Para ello se generó un ráster de temperatura utilizando la herramienta IDW (Distancia Inversa Ponderada) de ArcGIS, en base a la temperatura determinada a una altura de 2000m, obtenida al aplicar la ecuación 7 para cada estación (Fries et al., 2012).

$$T_{det} = T_{prom} + (R * (Z_{det} - Z_{est})) \quad (\text{ec. 7})$$

Donde,

- T_{det} Temperatura determinada a una altura especificada
 T_{prom} Temperatura promedio anual de la estación [°C]
 R Coeficiente de correlación de Pearson entre la altura y temperatura de las estaciones meteorológicas a utilizar

Z_{det} Altura a la que se va a determinar la temperatura [m]

Z_{est} Altura a la que se encuentra la estación meteorológica [m]

Posteriormente se generó un modelo digital de terreno (MDT) utilizando la herramienta Crear TIN de ArcGIS, en base a las curvas de nivel 1:50.000 provistas por el IGM (Instituto Geográfico Militar). Con este dato, se aplicó la ecuación 8 en Raster Calculator de ArcGIS, para obtener la temperatura media en el área de estudio (considerando la gradiente altitudinal). Finalmente, para obtener un solo valor de temperatura para toda el área de estudio, se extrajo el valor promedio del ráster de temperatura (T_{xy}).

$$T_{xy} = IDW + (R * (MDT - Z_{det})) \quad (\text{ec. 8})$$

Donde,

T_{xy} Ráster de la temperatura media (considerando el gradiente altitudinal)

IDW Ráster de temperatura obtenido en base a la temperatura determinada [°C]

R Coeficiente de correlación de Pearson entre la altura y temperatura de las estaciones meteorológicas a utilizar [°C/m]

MDT Ráster del modelo digital de terreno [m]

Z_{det} Altura a la que se determinó el ráster de temperatura media [m]

4.4.5. Evapotranspiración real (ETR)

Para estimar la evapotranspiración real se siguió la metodología aplicada por Barrantes & Vega (2001), que se basa en las ecuaciones establecidas por Rodriguez (1983). La ETR se calcula de la siguiente forma (ec. 9)

$$ETR = F * ETP \quad (\text{ec. 9})$$

Donde,

ETR Evapotranspiración real

F Función de evapotranspiración [mm]

ETP Evapotranspiración Potencial [mm]

El factor F es una función de evapotranspiración y depende del factor RE , que relaciona las curvas de evapotranspiración real y potencial. Se calcula así:

$$RE = \frac{ETP}{PPT} \quad (\text{ec. 10})$$

Donde,

ETP Evapotranspiración Potencial [*mm*]

PPT Precipitación total [*mm*]

Para valores de *RE* entre 0,45 y 1,5 el valor de *F* está dado por,

$$F = 1,112 - (0,44 * RE) \quad (\text{ec. 11})$$

Para valores de *RE* entre 0,0625 y 0,45 el valor de *F* está dado por,

$$F = (7,4617 * RE^3) - 10,46(RE^2) + (4,63 * RE) + 0,27 \quad (\text{ec. 12})$$

5.5. Estimación del costo de oportunidad

Para el cálculo del costo de oportunidad de la ganadería (*CO*) en el área de estudio, se procedió a determinar el ingreso neto total por ganadería (ec. 13), con base a la información obtenida por revisión bibliográfica. De esta forma se puede estimar la rentabilidad a la que los dueños de la tierra renuncian, para mantener el uso de suelo como páramo.

$$CO = \frac{\sum(Yt - Ct) + \sum(Ya - Cp)}{A} \quad (\text{ec. 14})$$

Donde,

CO Costo de oportunidad de la ganadería

Yt Ingreso total por la venta del producto

Ct Costos efectivos de producción

Ya Ahorros por autoconsumo

Cp Costos de producción para autoconsumo

A Superficie de pastoreo para ganadería

Se decidió trabajar con los valores obtenidos en dos publicaciones, Castro (2011) y Barrera, Alwang, & Cruz (2009). En la publicación de Castro (2011) se consideraron las variables de la (ec. 3), y también la mano de obra familiar, y los ingresos brutos basados en las cantidades (y costos unitarios) de los productos generados por la ganadería. Mientras que en la publicación de Barrera et al. (2009), se consideraron las variables: inversión inicial en animales (en un escenario considerando el caso de intensificación de la actividad ganadera), amortización anual, costos por manejo del ganado, costos por pastura, y el interés anual.

Con el fin de calcular el valor presente de los CO obtenidos en estas dos publicaciones, se utilizó la ecuación 15, que sirve para determinar el valor futuro de un monto, dado su valor presente (Cabeza & Castrillón, 2012). Primero se determinó el valor futuro del CO de la publicación de Barrera et al. (2009) para el año 2010, y posteriormente se lo promedió con el valor obtenido de la publicación de Castro (2011). Finalmente, este valor promedio se lo pasó al año 2018 utilizando la misma ecuación.

$$VF = VA * (1 + i)^n \quad (\text{ec. 15})$$

Donde,

VF	Valor futuro
VA	Valor actual
i	Tasa de interés (en nuestro caso la inflación)
n	número de períodos

CAPÍTULO III

6. RESULTADOS

6.1. Cobertura de páramo

6.1.1. Clasificación supervisada

A partir de la información recopilada en la visita de campo se establecieron 28 Regiones de Interés (ROI) (ver Figura 9 y Tabla 6), y 7 clasificaciones de uso de suelo a ser utilizadas en la clasificación supervisada. La observación más importante durante la visita de campo fue la casi total desaparición de la Laguna de Saguin, que poseía una extensión aproximada de 13 ha en 2006), y en el momento de la visita de campo no poseía espejos de agua en el momento de la visita (Anexo 4).

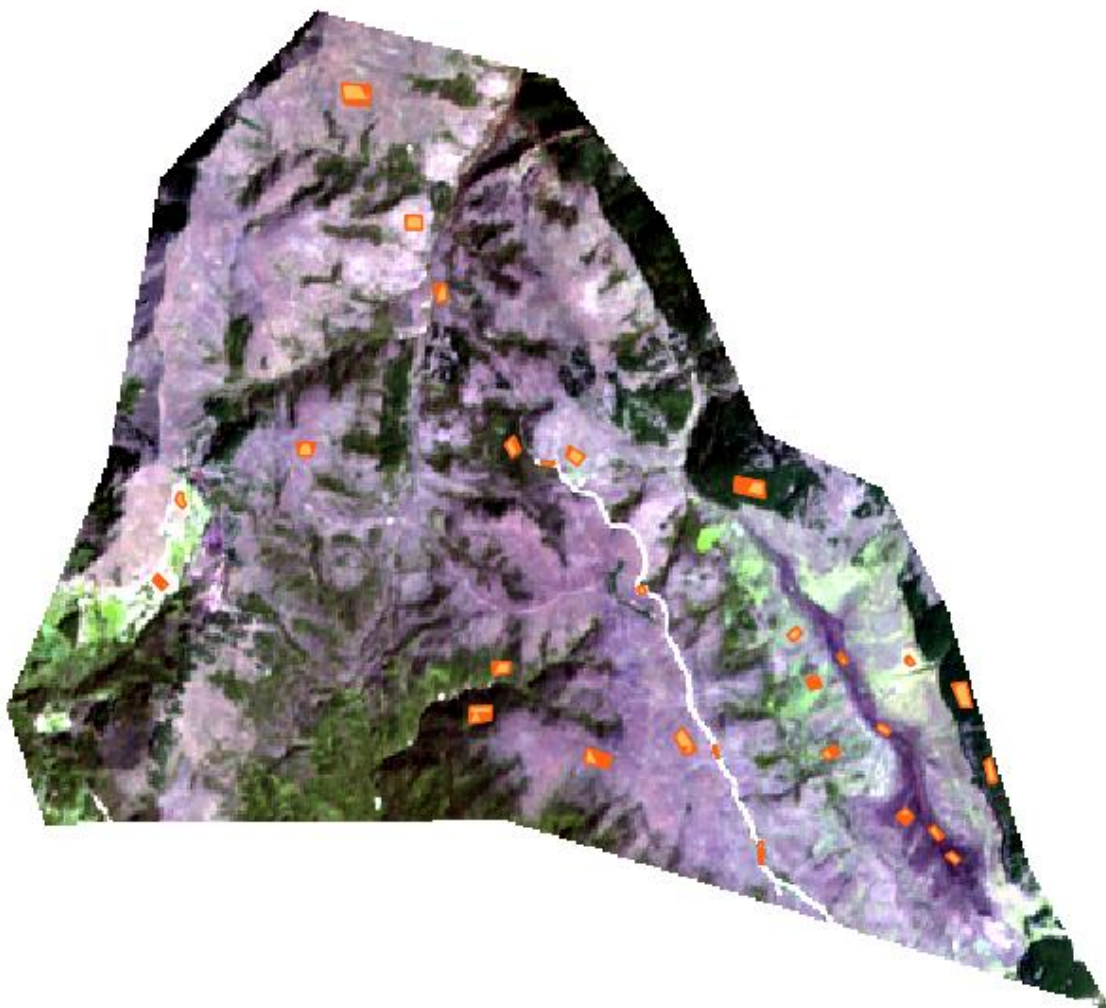


Figura 8. ROI determinados para la clasificación supervisada (polígonos en color naranja).

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Clases y ROI definidos para la primera clasificación supervisada.

Clases	Número de ROI
Páramo	7
Bosque nativo	3
Bosque de pinos	3
Humedal	5
Vía	4
Arbustos	3
Pastos	3

Fuente: Elaboración propia

Después de realizarse la primera clasificación supervisada se pudo observar una confusión de clases entre las coberturas de Bosque nativo y el Bosque de pinos, por lo que se decidió fusionar ambas clases y denominarlas como Bosque. También se generó una confusión de clases entre la cobertura de Pastos, Vías y Arbustos, la cual se pudo corregir al dejar de lado los ROI de Pastos; en definitiva, se excluyó esta última clase y se la incluyó en la clase Arbustos.

A partir de los ajustes generados luego de la primera clasificación supervisada se decidió trabajar con 5 clases y 28 ROI (ver Tabla 7). Los resultados de la segunda clasificación supervisada (en base a dichas clases) se pueden observar en la Figura 10, en donde se distinguen los resultados obtenidos con el uso solamente de las clases, y los obtenidos con el algoritmo del método de Máxima Probabilidad. Se optó por clasificar las coberturas por este método debido a que generó los mejores resultados.

Tabla 6. Clases y ROI definidos para la segunda clasificación supervisada.

Número de clase	Clases	Número de ROI
1	Páramo	7
2	Bosque	6
3	Humedal	5
4	Vía	4
5	Arbustos	3

Fuente: Elaboración propia

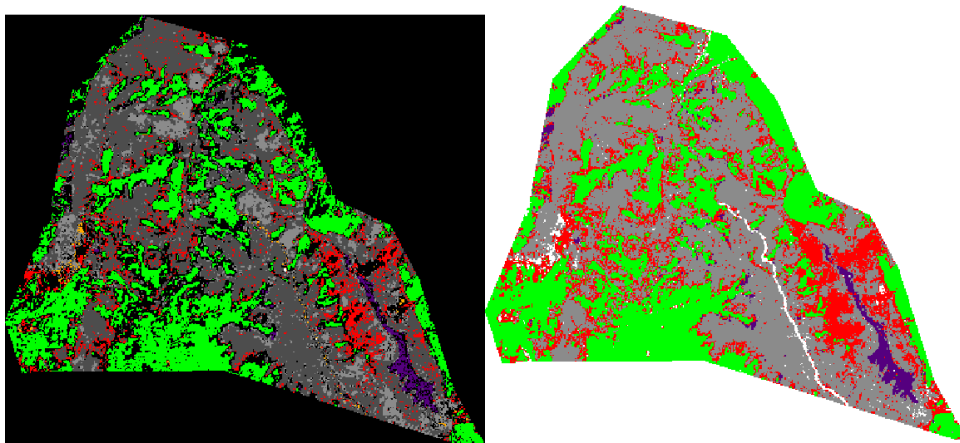


Figura 9. Clasificación supervisada en base a las clases definidas (izq.), clasificación supervisada en base a las clases definidas y el logaritmo del Método de Máxima Probabilidad.

Fuente: Elaboración propia

5.1.2. Post-procesamiento y análisis estadístico de la clasificación

Después de eliminar en los píxeles aislados de la clasificación supervisada, se procedió a eliminar manualmente áreas conflictivas, utilizando QGIS. La única zona en donde se hicieron cambios mayores fue en el margen derecho de la laguna de Saguin (actualmente un humedal), debido a que se presentó una confusión de clases entre Páramo y Arbustos. En base a lo observado en campo se optó por convertir manualmente los píxeles de esta zona a la clase Páramo.

En cuanto al análisis estadístico de la clasificación, como paso previo se generaron 39 ROI al azar con un distanciamiento de 1.000m, con el fin de evitar su traslape. Con estos ROI se generó la Matriz de Confusión y se calcularon los índices Kappa de la clasificación (ver Tabla 8 y Tabla 9).

Tabla 7. Matriz de confusión de clases.

Clase / Referencia	1	2	3	4	5	Total
1	5912	219	7	2	172	6312
2	43	4172	0	0	11	4226
3	112	0	326	0	2	440
4	17	4	0	11	2	34
5	710	408	0	0	282	1400
Total	6794	4803	333	13	469	12412

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Índices Kappa y resultados de la matriz de confusión.

Clase	Precisión del productor [%]	Precisión del usuario [%]	Coefficiente Kappa
1	87,02	93,66	0,86
2	86,86	98,72	0,98
3	97,90	74,09	0,73
4	84,62	32,35	0,32
5	60,13	20,14	0,17
Precisión total [%] =86,23			Clasificación Kappa =0,76

Fuente: Elaboración propia

5.1.3. Área estimada

Siendo favorables los resultados del análisis estadístico, se generó el mapa de uso de suelo para el área de estudio (Figura 11); además se estimaron las áreas para cada cobertura (ver Tabla 10), en donde el Páramo ocupó 391,8 *ha*.

Tabla 9. Estimación del área ocupada por cobertura.

Clase	Número de Píxeles	Porcentaje [%]	Área [<i>ha</i>]
Páramo	39180	48,67	391,8
Bosque	25387	31,54	253,87
Humedal	1276	1,59	12,76
Vía	517	0,64	5,17
Arbustos	14136	17,56	141,36

Fuente: Elaboración propia

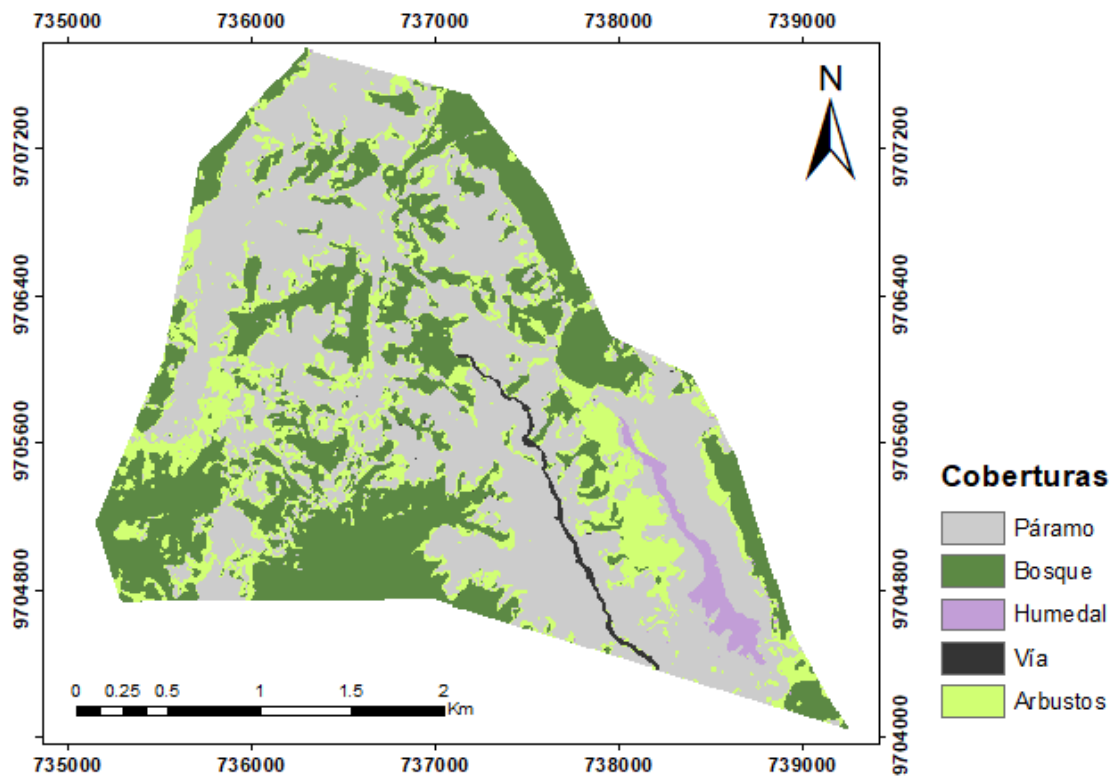


Figura 10. Mapa de uso de suelo del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia

6.2. Oferta hídrica

6.2.1. Precipitación media anual

Se determinaron las áreas y el promedio de precipitación entre cada dos Isoyetas a partir de las Isoyetas generadas en ArcGIS (Figura 12). Como resultado se obtuvo una precipitación media de $604,13 \text{ mm/año}$ para toda el área de estudio.

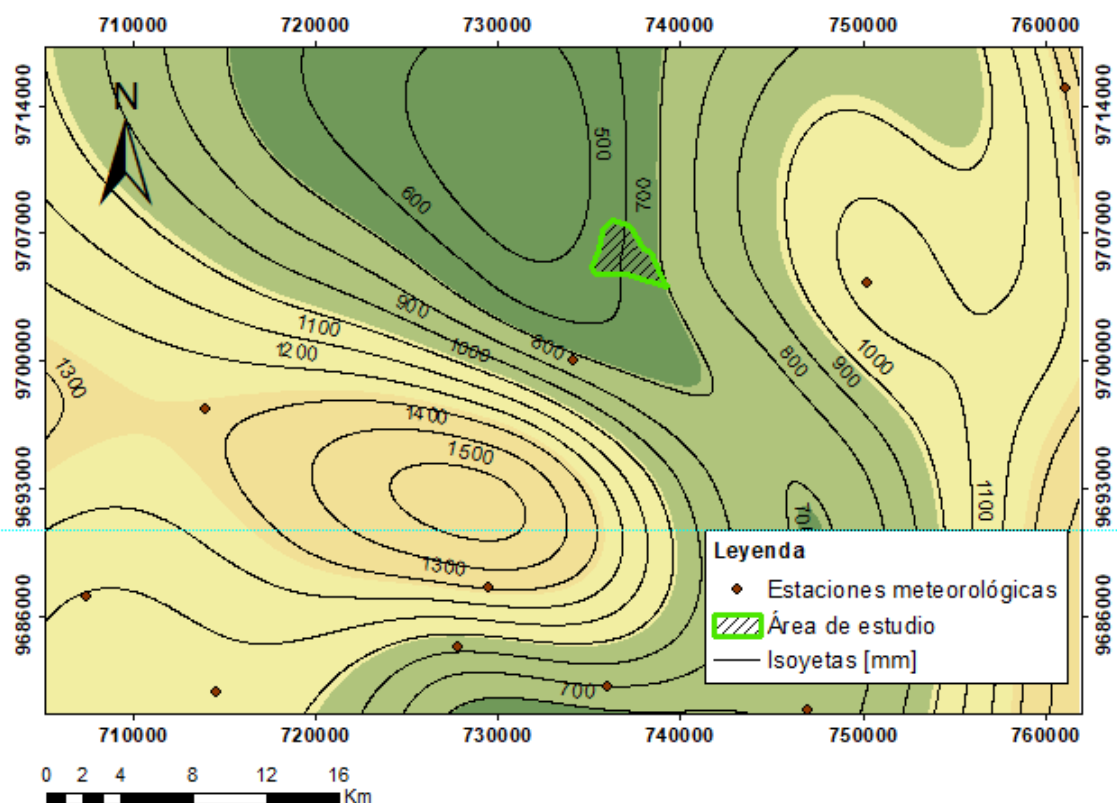


Figura 11. Mapa de Isoyetas generado en base a los registros de las estaciones meteorológicas seleccionadas.

Fuente: Elaboración propia

5.2.2. Temperatura ambiente

Para la obtención de la temperatura determinada, se obtuvo el índice de correlación entre la temperatura registrada en las estaciones y la altura a la que se encuentran (ver Figura 13). Luego se procedió a utilizar la herramienta Raster Calculator de ArcGIS con el fin de obtener la temperatura determinada en función del ráster de temperatura promedio, el índice de correlación (-0,007), la altura determinada (2.000 m) y la altura a la que se encuentra cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas. Los resultados se pueden ver en la Figura 14. El valor promedio del ráster, que viene a ser la temperatura media anual en el área de estudio fue de 8.94°C.

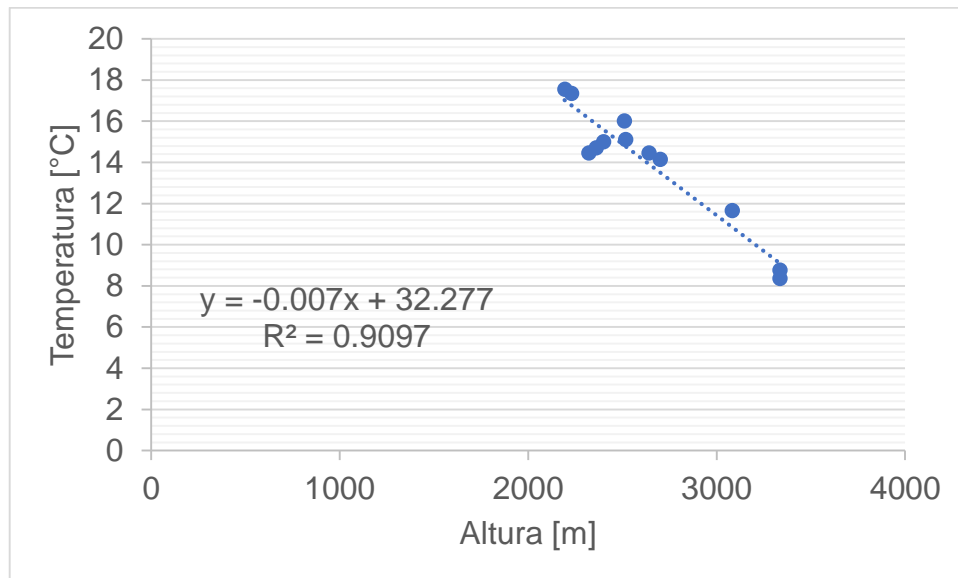


Figura 12. Índice de correlación entre temperatura media registrada en las estaciones y la altura a la que se encuentran.

Fuente: Elaboración propia

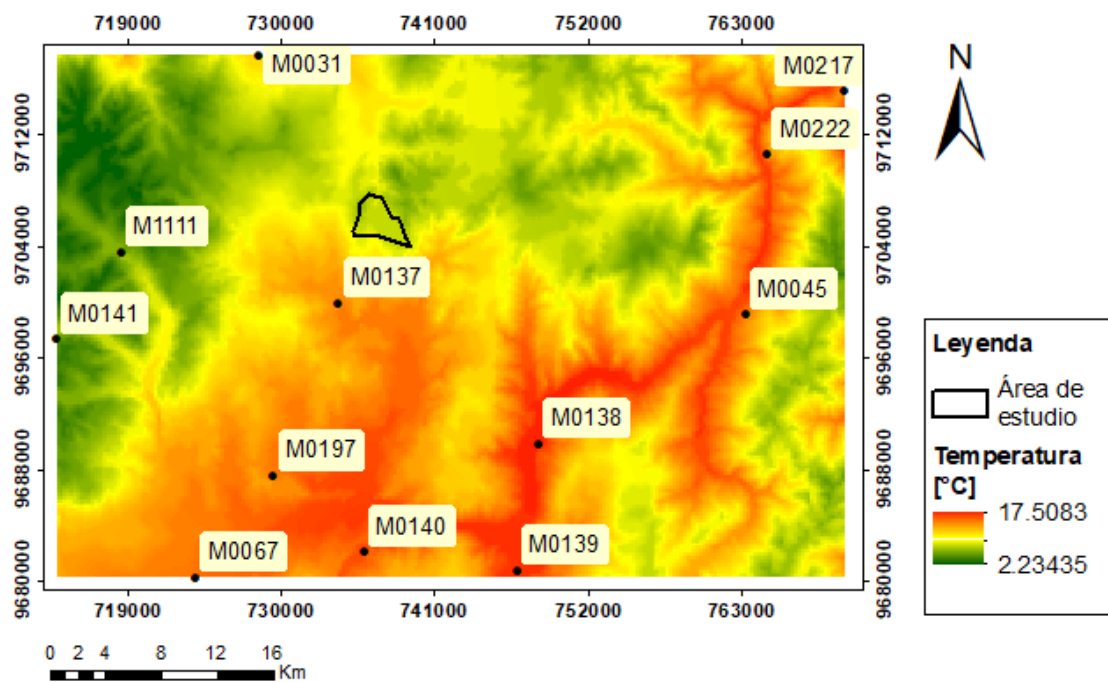


Figura 13. Ráster de la temperatura media en el área de estudio, considerando la gradiente altitudinal.

Fuente: Elaboración propia

5.2.3. Evapotranspiración

La biotemperatura media anual (equivalente a la temperatura media anual) se estimó en 8,94 °C, y con ésta se obtuvo una ETP de 526,83 $mm/año$. El coeficiente RE tuvo un valor de 0.87, y como este valor se encuentra entre 0,45 y 1,5 el valor de F resultó ser 0,7283. Con este último valor se pudo estimar una evapotranspiración de 383,69 $mm/año$.

5.2.4. Oferta hídrica

Con todos los valores antes obtenidos y aplicando la ecuación del balance hídrico simplificado, en función de la precipitación media (604,13 $mm/año$) y la ETR (383,69 $mm/año$), se determinó una oferta hídrica de 220,44 $mm/año$ que equivale a 863.683,92 $m^3/año$.

6.3. Costo de oportunidad

Debido a la escasez de información actualizada sobre los ingresos netos por ganadería en el páramo, se decidió trabajar con los valores obtenidos en dos publicaciones, Castro (2011) y Barrera, Alwang, & Cruz (2009).

En la publicación de Castro (2011) se obtuvo un valor de 126,15 $\$/ha/año$ para CO, con datos del año 2010, promediado del CO de la actividad ganadera en cuatro localidades de páramo en Ecuador: Zuleta, Mojada, Carchi y Jimbura. En cambio, Barrera et al. (2009), estableció un ingreso neto de la ganadería (equivalente a CO) de 99 $\$/ha/año$ para la región de páramo de la microcuenca del río Illangama, ubicada en el cantón Guaranda, provincia de Bolívar.

El valor promedio del CO de ambas publicaciones, pasadas al año 2010, fue de 113,25 $\$/ha/año$. Con la tasa de inflación extraída de los informes del Banco Central, para el período 2008-2010 (6,8) y para el período 2010-2018 (3,19), se obtuvo un costo de oportunidad de la ganadería para el área de estudio de 145,59 $\$/ha/año$.

6.4. Valoración económica del servicio de provisión de agua

Con base a la extensión del área de estudio determinada (391,18 ha), y los cálculos de oferta hídrica (863.683 $m^3/año$) y Costo de oportunidad de la ganadería (145,59 $\$/ha/año$), se aplicó la metodología de Barrantes & Vega (2001). El índice de protección hídrica (α) de 0,79, fue extraído de la publicación de Castro (2011), quien la obtuvo del

promedio de los índices de los páramos herbáceos de cuatro microcuencas abastecedoras de agua para la ciudad de Loja. El resultado del valor económico del servicio de provisión de agua, en términos de calidad, fue de 0,052 \$/m³

$$VP = \frac{0,79 * (145,59 \text{ \$/ha/año}) * (391,8 \text{ ha})}{863.683,92 \text{ m}^3/\text{año}} = 0,052 \text{ \$/m}^3$$

7. DISCUSIÓN

La valoración económica del servicio de provisión de agua, de la zona contigua al bosque protector Cubilan, se realizó aplicando la metodología de Barrantes & Vega (2001), la cual ya ha sido aplicada en Ecuador por Castro (2011). El resultado obtenido en esta publicación (0,03 \$/m³) tiene un valor ligeramente menor al calculado (0,052 \$/m³), lo cual puede deberse a factores relacionados con las características de la zona de estudio, como también al efecto de los procesos económicos como la inflación en la estimación del costo de oportunidad (actual) de la ganadería.

Existe evidencia de que la ganadería extensiva puede llegar a darse de manera sostenible en el páramo, siempre y cuando no se exceda la carga de animales (Vargas, 2013); sin embargo, se desconoce la carga animal en el área de estudio y el efecto de las actividades *ex situ*. Existe una gran extensión de siembra de pinos en las inmediaciones del área de estudio, y se puede observar también, cómo parte del agua que alimentaba a la laguna de Saguin (cuyo espejo de agua ha desaparecido casi completamente) ha sido desviada para utilizarse en actividades relacionadas a la agricultura y ganadería. Estos factores pueden afectar el estado de conservación del páramo, y por tanto en su capacidad de absorber los impactos de la ganadería (Hofstede, 2001).

El método propuesto por Barrantes & Vega (2001), determina el valor económico del servicio de provisión de agua en términos de calidad, cantidad y perpetuidad. Considerando el efecto que tiene la ganadería en el páramo, que altera la densidad del suelo e incrementa la generación de sedimentos (Céleri et al., 2012), podríamos hablar de que dicho servicio está valorado más en términos de calidad que de cantidad y perpetuidad.

En cuanto al mapa de uso de suelo, generado a partir de imágenes de Sentinel-2A, el análisis estadístico generó precisiones de usuario (32,35% y 20,14%) e índices Kappa bajos (0,32 y 0,17) para las coberturas de Vía y Arbustos respectivamente. Esto

probablemente ocurrió debido a la confusión de clases generada entre estas dos coberturas en dos regiones de la imagen satelital. Si bien estos valores no fueron óptimos, dichas regiones se pudieron corregir manualmente en QGIS, y no terminaron afectando a la estadística general del mapa de coberturas, que tuvo una precisión total (86,23%), y un índice Kappa global (0,76) de precisión considerable (Casco, Arias, Mareco, & Kindgard, 2016).

El costo de oportunidad de la ganadería se calculó en base a los resultados obtenidos por Castro (2011) (126,15 \$/ha/año) y Barrera et al. (2009) (99 \$/ha), los cuales tienen valores muy similares. Debido a que no fueron datos actuales, se pasaron al presente (año 2018) utilizando una ecuación que sirve para determinar el valor de un monto futuro (ec. 15), tomando como tasa de interés a la inflación. Este valor a futuro puede diferir del valor verdadero actual, debido a que otros factores económicos y sociales de la zona podrían alterar el costo de oportunidad.

Castro (2011) y Barrantes & Vega (2001) en sus publicaciones, utilizaron el método de Holdridge para estimar la evapotranspiración real en sus áreas de estudio, para determinar luego la oferta hídrica. Este método a pesar de ser muy fácil de utilizar y de requerir pocos insumos (solamente se necesitan registros de temperatura y precipitación), no es muy preciso para grandes altitudes (Lavao, 2016). Por lo que podrían existir diferencias significativas entre el valor real y la estimación realizada en esta investigación.

8. CONCLUSIONES

La metodología propuesta por Barrantes & Vega (2001) es sumamente fácil de utilizar, debido a que requiere de cálculos sencillos, y puede aplicarse con insumos meteorológicos, cartográficos y socioeconómicos de libre acceso. A pesar de que su precisión puede incrementarse, si se utilizan métodos más complejos para el cálculo de la oferta hídrica y se realiza el levantamiento de encuestas para estimar el costo de oportunidad; los resultados generados con los insumos de libre acceso pueden ser muy útiles para un análisis de prefactibilidad de un esquema de PSA.

Tomando como referencia el valor del servicio de provisión de agua obtenido por Castro (2011) (0,03 \$/m³), y considerando dos factores: el efecto de la inflación y otros procesos económicos sobre el costo de oportunidad de la ganadería, y las condiciones meteorológicas del área de estudio (que fueron distintas a las analizadas por Castro 2010); Se puede concluir que el valor obtenido en esta investigación (0,052 \$/m³) presenta una buena aproximación a la realidad del área de estudio.

Los factores *ex-situ* pueden jugar un rol importante en la valoración económica de los servicios hídricos del área de estudio, por lo que se necesita actualizar la información respecto a los problemas ambientales que afectan al recurso hídrico, su grado de afectación y los actores involucrados. A partir de ello se podría evaluar la validez y la utilidad de los resultados obtenidos en esta investigación.

9. RECOMENDACIONES

Para mejorar las estimaciones de la oferta hídrica, se recomienda calcular las pérdidas por evapotranspiración mediante métodos que utilicen más variables climáticas, como el método de Hargreaves y Samani. Esta metodología es más precisa y tiene un mejor desempeño en áreas ubicadas a grandes alturas (Llanes, 2014). Además, se podría realizar el levantamiento de información socioeconómica mediante encuestas, con el fin de mejorar la estimación del costo de oportunidad de la ganadería.

En caso de considerarse la valoración de los servicios ambientales hídricos para esta zona, con el fin de establecer un esquema PSA, recomiendo evaluar la posibilidad de ampliar el área de estudio, e incorporar al cálculo el servicio de regulación hídrica, ya que este cumple un papel clave en la provisión de agua de los páramos (Céleri, 2010).

Se debe considerar la modificación de la metodología de Barrantes & Vega, 2001 en función de los factores *ex-situ* antes mencionados, con la finalidad de que se ajuste de mejor manera a las condiciones actuales del área de estudio. Además, se deberá analizar a fondo el rol de estos factores en la provisión de agua a largo plazo, y cómo afectan la calidad del recurso hídrico.

10. REFERENCIAS

- Aguilar, H., Mora, R., & Vargas, C. (2014). Metodología para la corrección atmosférica de imágenes ASTER, RAPIDEYE, SPOT 2 y Landsat 8 con el módulo flaash del software ENVI. *Revista Geográfica de América Central*, 2(53), 39-59.
<https://doi.org/10.15359/rgac.2-53.2>
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Food & Agriculture Org.
- Arozarena, A. (2001). Teledetección y sistemas de tratamiento digital de Imágenes. Recuperado a partir de http://ocw.upm.es/ingenieria-cartografica-geodesica-y-fotogrametria/topografia-cartografia-y-geodesia/contenidos/TEMA_11_FOTOGRAMETRIA_Y_TELEDETECCION/Teledeteccion/microsoft-word-teledeteccion_y_sist_tratamiento_digital_imagenes.pdf
- Ayala, M., & Menenti, M. (2001). Metodología para la búsqueda del mejor clasificador de imágenes de satélite. Recuperado a partir de <http://www.aet.org.es/congresos/ix/Lleida103.pdf>
- Azqueta, D., Dominguez, A., & O’Ryan, R. (2007). Introducción a la Ingeniería Ambiental. En *Introducción a la Ingeniería Ambiental* (Segunda edición). MCGRAW HILL EDUCATION.
- Barrantes, G., & Vega, M. (2001). *Evaluación del servicio ambiental hídrico en la cuenca del río Savegre con fines de Ordenamiento territorial*. Recuperado a partir de <http://www2.inbio.ac.cr/araucaria/Hidrico.pdf>
- Barrera, V., Alwang, J., & Cruz, E. (2009). Viabilidad socio-económica y ambiental del sistema papa-leche en la microcuenca del río Illangama-Ecuador. Recuperado a partir de https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/68538/3705_PASTOSGANADERIA_2008.pdf?sequence=1
- Vega, E., & Jara, J. (2007). Estimación de la evapotranspiración de referencia para dos zonas (Costa Y Región Andina) del Ecuador. *Engenharia Agrícola*, 29.
<https://doi.org/10.1590/S0100-69162009000300006>
- Cabeza, leonor, & Castrillón, J. (2012). *Matemáticas financieras* (5ed ed.). Universidad del Norte.

- Cárdenas, M. F., & Tobón, C. (2017). Recuperación del funcionamiento hidrológico de ecosistemas de páramo en Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 20(2), 403-412.
- Carrera-Villacrés, D. V., Guevara-García, P. V., Tamayo-Bacacela, L. C., Balarezo-Aguilar, A. L., Narváez-Rivera, C. A., & Morocho-López, D. R. (2016). Relleno de series anuales de datos meteorológicos mediante métodos estadísticos en la zona costera e interandina del Ecuador, y cálculo de la precipitación media. *Idesia (Arica)*, 34(3), 81-90. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292016000300010>
- Casco, G., Arias, L., Mareco, H., & Kindgard, A. (2016). *Informe final de evaluación de exactitud temática del mapa de cobertura forestal y cambio de uso de la tierra*. Recuperado a partir de http://www.infona.gov.py/application/files/6514/7405/3096/Evaluacion_exactitud_Mapas_000511_160516.pdf
- Castro, M. (2011). Una valoración económica del almacenamiento de agua y carbono en los bofedales de los páramos ecuatorianos - la experiencia en Oña-Nabón-Saraguro-Yacuambi y el Frente Suroccidental de Tungurahua. EcoCiencia / Wetlands International / UTPL / MAE. Recuperado a partir de <http://suia.ambiente.gob.ec/documents/783967/892190/Una+valoraci%C3%B3n+econ%C3%B3mica+del+almacenamiento+de+agua+y+carbono+en+los+Bofedales+de+los+P%C3%A1ramos+Ecuatorianos..compressed.pdf/044ef817-11d0-4330-b58a-16fb975dc473>
- Célleri, R. (2010). Estado del conocimiento técnico científico sobre los servicios ambientales hidrológicos generados en los Andes. En *Servicios ambientales hidrológicos en la región andina. Estado del conocimiento, la acción y la política para asegurar su provisión mediante esquemas de pago por servicios ambientales*. (Primera edición). Lima. Recuperado a partir de http://www.rimisp.org/wp-content/files_mf/13599885926Serviciosambientaleshidrol%C3%B3gicosenlaRegi%C3%B3nAndina.pdf
- Célleri, R., Cisneros, F., & Buytaert, W. (2012). Hidrología del páramo andino: propiedades, importancia y vulnerabilidad.

- Charaqui, J., & Suarez, D. (2016). Análisis de la regeneración natural después de la explotación de pino en el páramo de Tamboloma (Tungurahua- Ecuador). Recuperado 2 de junio de 2018, a partir de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4623>
- Chuvieco, E., & Salas, J. (2000). Corrección Atmosférica y Topográfica, Información Multi-temporal y Auxiliar Aplicadas a la Cartografía de Modelos de Combustibles con Imágenes Landsat-TM. Recuperado a partir de http://www.academia.edu/13630029/Correcci%C3%B3n_Atmosf%C3%A9rica_y_Topogr%C3%A1fica_Informaci%C3%B3n_Multi-temporal_y_Auxiliar_Aplicadas_a_la_Cartograf%C3%ADa_de_Modelos_de_Combustibles_con_Im%C3%A1genes_Landsat-TM
- Congedo, L. (2014). *Semi-Automatic Classification Plugin User Manual*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1219.3524>
- Costanza, R., d'Arge, R., Groot, R. de, Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., ... Belt, M. van den. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253-260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Fries, A., Rollenbeck, R., Nauß, T., Peters, T., & Bendix, J. (2012). Near surface air humidity in a megadiverse Andean mountain ecosystem of southern Ecuador and its regionalization. *Agricultural and Forest Meteorology*, 152, 17-30. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.08.004>
- Fundación ECOHOMODE. (2006). *Plan de Manejo Participativo de los recursos naturales del bosque protector Cubilan*. Azogues, Provincia del Cañar: documento financiado por el Fondo Flamenco para el Bosque Tropical, administrado por la Agencia de Naturaleza y Bosque (ANIMAL-Ministerio de la Comunidad Flamenca), y supervisado por Groenhardt vzw.
- García, C. C., Rogel, Y. Á., & Pérez, M. C. G. (2004). *El empleo de los SIG y la teledetección en planificación territorial*. EDITUM.
- García, I., Martínez, A., & Vidriales, G. (2003). Balance hídrico de la cuenca del río Pixquiac [Informe técnico].
- Garzón, A. (2010). Estado de la acción acerca de los mecanismos de financiamiento de la protección o recuperación de servicios ambientales hidrológicos generados en los

- Andes. En *Servicios ambientales hidrológicos en la región andina. Estado del conocimiento, la acción y la política para asegurar su provisión mediante esquemas de pago por servicios ambientales*. (Primera edición). Lima. Recuperado a partir de http://www.rimisp.org/wp-content/files_mf/13599885926Serviciosambientaleshidrol%C3%B3gicosenlaRegi%C3%B3nAndina.pdf
- Gilabert, M. A., Gonzalez-Piqueras, J., & García-Haro, J. (1997). Acerca de los índices de vegetación. *Revista de teledetección: Revista de la Asociación Española de Teledetección*, ISSN 1133-0953, Nº. 8, 1997, 8.
- Gómez, R. (2009). Conceptos de Geomática y estudios de caso en México. Recuperado 5 de junio de 2018, a partir de <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/18>
- Hernández, J., & Montaner, D. (2009). Patrones de respuesta espectral. Recuperado a partir de <http://www.gep.uchile.cl/Publicaciones/Hern%C3%A1ndez%20&%20Montaner%2009%20SAF.pdf>
- Hofstede, R. (2001). El impacto de actividades humanas en el páramo. Recuperado a partir de <http://www.portalces.org/paramos/directorio/referencias-bibliograficas/articulos-libros/impacto-de-actividades-humanas-paramo>
- Hofstede, R. (2014). Los páramos andinos ¿que sabemos? Recuperado a partir de http://www.academia.edu/12036282/Los_p%C3%A1ramos_andinos_que_sabemos
- INAMHI. (2015). Red de estaciones meteorológicas. Recuperado a partir de <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/red-de-estaciones-meteorologicas/>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi, & IGAC (Eds.). (2007). *Mejora de los sistemas de cartografía del territorio colombiano*. Bogotá, Colombia: IGAC.
- Kappelle, M., & Horn, S. P. (2005). *Páramos de Costa Rica*. Editorial INBio.
- Lavao, S. (2016). Medición y modelamiento de la evapotranspiración real del cultivo de clavel en invernadero en la sabana de Bogotá, usando lisímetros electrónicos de pesada. Recuperado a partir de <http://www.bdigital.unal.edu.co/52512/1/lavaopastranasergioandres.2016.pdf>

- Llambí, L. (2014). Algunas implicaciones de la diversidad... (PDF Download Available). Recuperado 2 de junio de 2018, a partir de https://www.researchgate.net/publication/267373864_Algunas_implicaciones_de_la_diversidad_socio-ambiental_andina_para_una_agricultura_sustentable_en_los_paramos
- Llambí, L., Soto-W, A., Célleri, R., De Bièvre, B., Ochoa, B., & Borja, P. (2012). Ecología, hidrología y suelos de páramos. Recuperado 2 de junio de 2018, a partir de <http://www.flacsoandes.edu.ec/libros/132917-opac>
- Llanes, O. (2014). Determinación de la evapotranspiración potencial ETp y de referencia ETo como indicador del balance hídrico del corazón agrícola de México. *JUYYAANIA*, 2, 119-129.
- Lomas, P., Martín-López, B., Louit Lobos, C., Montoya, D., Montes, C., & Álvarez, S. (2005). *Guía práctica para la valoración económica de los bienes y servicios ambientales de los ecosistemas*.
- Macedo, A., Pajares, G., & Santos, M. (2010). Clasificación no supervisada con imágenes a color de cobertura terrestre. *Agrociencia*, 44(6), 711-722.
- Martínez-Vega, J., Martín, M. P., & Díaz, J. (2010, junio). Guía didáctica de Teledetección y Medio Ambiente. Recuperado a partir de <https://digital.csic.es/handle/10261/28306>
- Mas, J., Reyes, J., & Pérez, A. (2003). Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. *Investigaciones geográficas*, (51), 53-72.
- Morales-Betancourt, J. A., & Estévez-Varón, J. V. (2006). El páramo: ¿ecosistema en vía de extinción? *Revista Luna Azul*, (22). Recuperado a partir de <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=321727224004>
- Olaya, V. (2015). Estadística espacial. Recuperado 5 de junio de 2018, a partir de http://volaya.github.io/libro-sig/chapters/Estadistica_avanzada.html
- Pearce, D., & Moran, D. (1994). The economic Value of Biodiversity. Earthscan Publications Ltd, London. Recuperado a partir de <https://www.cbd.int/doc/external/iucn/iucn-biodiversity-value-1994-en.pdf>
- Pérez, C., & Muñoz, Á. (2006). *Teledetección: nociones y aplicaciones*. carlos perez.
- Quintero, M. (2010). Una visión integral del estado del arte sobre los servicios ambientales hidrológicos en los Andes. En *Servicios ambientales hidrológicos en la región andina*.

- Estado del conocimiento, la acción y la política para asegurar su provisión mediante esquemas de pago por servicios ambientales.* (Primera edición). Lima. Recuperado a partir de http://www.rimisp.org/wp-content/files_mf/13599885926Serviciosambientaleshidrol%C3%B3gicosenlaRegi%C3%B3nAndina.pdf
- Rodríguez, D., & Sánchez, N. (2015). *Cuestiones de teledetección*. Recuperado a partir de https://books.google.com/books/about/CUESTIONES_DE_TELEDETECCI%C3%93N.html?hl=es&id=tXxxCgAAQBAJ
- SAGARPA. (2004). Hidrología aplicada a las pequeñas obras hidráulicas. Recuperado a partir de http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/noticias/2012/Documents/FICHAS%20TECNICAS%20E%20INSTRUCTIVOS%20NAVA/INSTRUCTIVO_HIDROLOG%C3%8DA.pdf
- Sánchez, F., García, M., Jaramillo, O., & Verdugo, N. (2010). Estudio Nacional del Agua - Capítulo 3 (Agua superficial). Recuperado a partir de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021888/CAP3.pdf>
- Sánchez, J. (2006). Tema: Evapotranspiración. Recuperado a partir de <http://hidrologia.usal.es/temas/Evapotransp.pdf>
- Santos, C., Lorite, I., Allen, R., Tasumi, M., Gavilán, P., & Fereres, E. (2007). *Mejora de la gestión de los recursos hídricos por medio de la integración de técnicas de teledetección y modelos de simulación*. España: Analistas económicos de andaluacía. Recuperado a partir de <https://www.economiaandaluza.es/sites/default/files/cap496.pdf>
- Schulz, J., & García, R. (2015). Balance hídrico y recarga de acuíferos. Recuperado a partir de http://aih-cl.org/cursos/Balance_y_Recarga_de%20Acuiferos_Version_Final.pdf
- Segerer, C., & Villodas, R. (2006). Hidrología 1. Recuperado a partir de <http://www.conosur-rirh.net/ADVF/documentos/hidro1.pdf>
- Sobrino, J. A. (2001). *Teledetección*. Universitat de València.
- UNICEN. (2003). Apuntes Unidad 3: Evaporación y evapotranspiración. Recuperado a partir de <https://www.economiaandaluza.es/sites/default/files/cap496.pdf>



- Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. (2009). Apuntes sobre hidrología. Recuperado a partir de <http://www.uaaan.mx/~jaflores/humedad/precipitacionApuntes.pdf>
- Universidad de Murcia. (2003). Apuntes sobre teledetección: Tema 7. Recuperado a partir de <http://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema07.pdf>
- USGS. (2012). Landsat—A Global Land-Imaging Mission. Recuperado a partir de <https://pubs.usgs.gov/fs/2012/3072/fs2012-3072.pdf>
- Vargas, O. (2013). Disturbios en los páramos andinos (pp. 39-57).
- Vásconez, P., & Hofstede, R. (2006). Los páramos ecuatorianos. *Botánica Económica de los Andes Centrales*. Recuperado a partir de <http://www.beisa.dk/Publications/BEISA%20Book%20pdfer/Capitulo%2006.pdf>
- Wunder, S., Wertz-Kanounnikoff, S., & Moreno-Sánchez, R. (2007). Pago por servicios ambientales: una nueva forma de conservar la biodiversidad. *Gaceta Ecológica*, ISSN 1405-2849, N°. 84-85, 2007, pags. 39-52, 84.

11. ANEXOS

Anexo 1

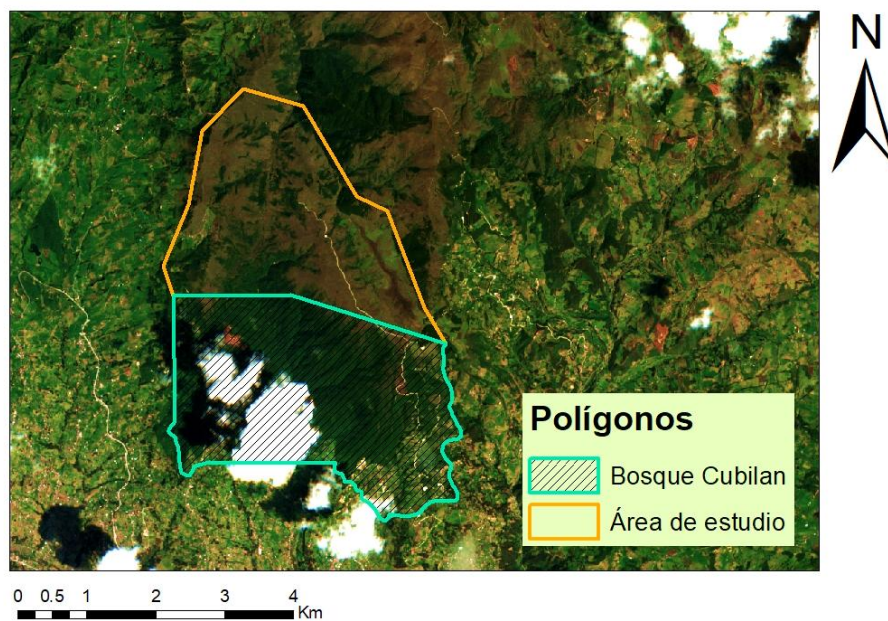


Figura 14. Polígono del área de estudio, delimitado en la composición RGB de las imágenes de Sentinel-2A.

Fuente: Elaboración propia

Anexo 2

Bitácora de Recorrido de Campo

DATOS GENERALES


Fecha y hora de salida	26/03/18 - 09:40 am
Lugar de visita	Zona contigua al Bosque Cubilán
Participantes del recorrido	Carlos Delúquez, Daniela Pinos, Alejandro Bowen.
Hora de retorno	15:40

Insumos

Insumo	Observaciones
GPS	Oficio de préstamo
Cámara Nikon Coolpix	

ITINERARIO

Mapa con regiones de interés para el recorrido de campo.



P1 → páramo
 P2 → páramo
 B1 → Arbusto

1, 2 → Pequitos parches de pino

Figura 15. Documento escaneado de la bitácora de visita de campo (página 1).

Fuente: Elaboración propia

Descripción:

Se procederán a recorrer primero las regiones de interés más cercanas a la laguna de Saguin (derecha del mapa), para posteriormente seguir el carretero hasta la parte más alejada (norte del mapa). Finalmente se recorrerán los puntos Páramo 3 y Cultivos 3, ubicados en la parte izquierda del mapa.

Observaciones:

Se evidencia ganadería en la laguna de Saguin (Pisadas, un poco de pastos y ganado vacuno pastando)
 La vía tiene 3m de ancho
 (cerca enter de la laguna)
 • A los costados de la vía hay vegetación nativa y pino
 • Pinos del costado derecho de la vía. (casi no hay vegetación nativa)
 • No existen espejos de agua en donde se encontraba la Laguna de Saguin.

LUGARES VISITADOS

Región de interés	Observaciones	Coordenadas	Fotografía
Bosque 1	Cobertura homogénea		
Bosque 2	Cobertura homogénea		
Bosque 3	Bosque nativo		
Cultivos 1	No existen cultivos es solo un pastizal		0456 0457

Figura 16. Documento escaneado de la bitácora de visita de campo (página 2).

Fuente: Elaboración propia

Registros fotográficos

Código de fotografía	Coordenada	Orient.	Descripción
0495		Este de la vía	Panorámico de la parte sur de la laguna de Saguis.
0496 0497	Al oeste del porche de pinos (Pinos 2)	"	Paysonas resider de pasto mezclado con páramo herbazal.

OBSERVACIONES GENERALES


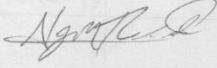

Del lado izquierdo de la carretera al páramo y borque se encuentran aparentemente en buen estado de conservación. No se evidencian presencia de ganado y prácticamente no hay pinos.

Figura 17. Documento escaneado de la bitácora de visita de campo (página 3).

Fuente: Elaboración propia

Del lado de la Laguna de Sagún se evidencia gran presencia de pinos y la presencia de ganado.

REGISTRO DE ASISTENCIA

Nombre	Número de cédula	Firma
Daniela Guadalupe Pinos Morochio	0302501515	
Carlos Alejandro Bana Quiróz	1312453811	
Carlos Santiago Delúquez Moreno	0105201016	

ANEXOS

Anexo 1. Coordenadas originales (mapa) de las regiones de interés

Región de interés	Coordenadas	Región de interés	Coordenadas
Bosque 1	736824.14 m E 9705002.21 m S	Páramo 1	737624.86 m E 9705051.67 m S
Bosque 2	736922.09 m E 9705325.84 m S	Páramo 2	737177.57 m E 9706161.12 m S
Bosque 3	736991.67 m E 9706098.94 m S	Páramo 3	736186.62 m E 9706102.62 m S
Cultivos 1	738269.53 m E 9705587.28 m S	Páramo 4	736658.25 m E 9706960.04 m S
Cultivos 2	738069.91 m E 9705418.53 m S	Pino 1	738720.76 m E 9705309.08 m S
Cultivos 3	735817.46 m E 9705860.43 m S	Pino 2	737872.68 m E 9706001.59 m S
		Pino 3	738863.31 m E 9704902.37 m S

Figura 18. Documento escaneado de la bitácora de visita de campo (página 4).

Fuente: Elaboración propia

Anexo 3



Figura 19. Registro fotográfico del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia

Anexo 4



Figura 20. Registro fotográfico de la Laguna de Saguin (actualmente un humedal).

Fuente: Elaboración propia